

ISSN 2224-5227

2015 • 4

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ
БАЯНДАМАЛАРЫ

ДОКЛАДЫ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

REPORTS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ЖУРНАЛ 1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1944 г.

PUBLISHED SINCE 1944



Бас редактор
ҚР ҰҒА академигі **М.Ж. Жұрынов**

Редакция алқасы:

хим.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әдекенов С.М.** (бас редактордың орынбасары), эк.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әділов Ж.М.**, мед. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Арзықұлов Ж.А.**, техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Бишімбаев У.К.**, а.-ш.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Есполов Т.И.**, техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұтанов Г.М.**, физ.-мат.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**, пед. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Пралиев С.Ж.**, геогр.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Северский И.В.**; тарих.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Сыдықов Е.Б.**, физ.-мат.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**, физ.-мат.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**, тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбүсейітова М.Х.**, экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА корр. мүшесі **Бейсембетов И.К.**, биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жамбакин К.Ж.**, тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Кәрібаев Б.Б.**, мед. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Локшин В.Н.**, геол.-мин. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірсеріков М.Ш.**, физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.**, физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Садыбеков М.А.**, хим.ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Сатаев М.И.**; ҚР ҰҒА құрметті мүшесі, а.-ш.ғ. докторы, проф. **Омбаев А.М.**

Редакция кеңесі:

Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина), Украинаның ҰҒА академигі **Неклюдов И.М.** (Украина), Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **Гордиенко А.И.** (Беларусь), Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Дука Г.** (Молдова), Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Илолов М.И.** (Тәжікстан), Қырғыз Республикасының ҰҒА академигі **Эркебаев А.Э.** (Қырғызстан), Ресей ҒА корр. мүшесі **Величкин В.И.** (Ресей Федерациясы); хим.ғ. докторы, профессор **Марек Сикорски** (Польша), тех.ғ. докторы, профессор **Потапов В.А.** (Украина), биол.ғ. докторы, профессор **Харун Парлар** (Германия), профессор **Гао Энджун** (КХР), филос. ғ. докторы, профессор **Стефано Перни** (Ұлыбритания), ғ. докторы, профессор **Богуслава Леска** (Польша), философия ғ. докторы, профессор **Полина Прокопович** (Ұлыбритания), профессор **Вуйцик Вольдемар** (Польша), профессор **Нур Изура Удзир** (Малайзия), д.х.н., профессор **Нараев В.Н.** (Ресей Федерациясы)

Главный редактор
академик НАН РК **М.Ж. Журинов**

Редакционная коллегия:

доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **С.М. Адекенов** (заместитель главного редактора), доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **Ж.М. Адилов**, доктор мед. наук, проф., академик НАН РК **Ж.А. Арзыкулов**, доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **В.К. Бишимбаев**, доктор сельскохозяйств. наук, проф., академик НАН РК **Т.И. Есполов**, доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Г.М. Мутанов**, доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**, доктор пед. наук, проф., академик НАН РК **С.Ж. Пралиев**, доктор геогр. наук, проф., академик НАН РК **И.В. Северский**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **Е.Б. Сыдыков**, доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**, доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**, доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Х. Абусейтова**, доктор экон. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И.К. Бейсембетов**, доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **К.Ж. Жамбакин**, доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Б. Карибаев**, доктор мед. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Локшин**, доктор геол.-мин. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Ш. Омирсериков**, доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов**, доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.А. Садыбеков**, доктор хим. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.И. Сатаев**; почетный член НАН РК, доктор сельскохозяйств. наук, проф., **А.М. Омбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **Гончарук В.В.** (Украина), академик НАН Украины **И.М. Неклюдов** (Украина), академик НАН Республики Беларусь **А.И.Гордиенко** (Беларусь), академик НАН Республики Молдова **Г. Дука** (Молдова), академик НАН Республики Таджикистан **М.И. Илолов** (Таджикистан), член-корреспондент РАН **Величкин В.И.** (Россия); академик НАН Кыргызской Республики **А.Э. Эркебаев** (Кыргызстан), д.х.н., профессор **Марек Сикорски** (Польша), д.т.н., профессор **В.А. Потапов** (Украина), д.б.н., профессор **Харун Парлар** (Германия), профессор **Гао Энджун** (КНР), доктор философии, профессор **Стефано Перни** (Великобритания), доктор наук, профессор **Богуслава Леска** (Польша), доктор философии, профессор **Полина Прокопович** (Великобритания), профессор **Вуйцик Вольдемар** (Польша), профессор **Нур Изура Удзир** (Малайзия), д.х.н., профессор **В.Н. Нараев** (Россия)

«Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан» ISSN 2224-5227

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5540-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год. Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г.Алматы, ул.Шевченко, 28, ком.218-220, тел. 272-13-19, 272-13-18

<http://nauka-nanrk.kz>, reports-science.kz

Адрес типографии: ИП «Аруна», г.Алматы, ул.Муратбаева, 75

©Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015 г.

E d i t o r i n c h i e f

M.Zh. Zhurinov, academician of NAS RK

Editorial board:

S.M. Adekenov (deputy editor in chief), Doctor of Chemistry, prof., academician of NAS RK; **Zh.M. Adilov**, Doctor of Economics, prof., academician of NAS RK; **Zh.A. Arzykulov**, Doctor of Medicine, prof., academician of NAS RK; **V.K. Bishimbayev**, Doctor of Engineering, prof., academician of NAS RK; **T.I. Yespolov**, Doctor of Agriculture, prof., academician of NAS RK; **G.M. Mutanov**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., academician of NAS RK; **S.Zh. Praliyev**, Doctor of Education, prof., academician of NAS RK; **I.V. Seversky**, Doctor of Geography, prof., academician of NAS RK; **Ye.B. Sydykov**, Doctor of Historical Sciences, prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., academician of NAS RK; **M.Kh. Abuseitova**, Doctor of Historical Sciences, prof., corr. member of NAS RK; **I.K. Beisembetov**, Doctor of Economics, prof., corr. member of NAS RK; **K.Zh. Zhambakin**, Doctor of Biological Sciences, prof., corr. member of NAS RK; **B.B. Karibayev**, Doctor of Historical Sciences, prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Lokshin**, Doctor of Medicine, prof., corr. member of NAS RK; **M.Sh. Omirserikov**, Doctor of Geology and Mineralogy, prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., corr. member of NAS RK; **M.A. Sadybekov**, Doctor of Physics and Mathematics, prof., corr. member of NAS RK; **M.I. Satayev**, Doctor of Chemistry, prof., corr. member of NAS RK; **A.M. Ombayev**, Honorary Member of NAS RK, Doctor of Agriculture, prof.

Editorial staff:

V.V. Goncharuk, NAS Ukraine academician (Ukraine); **I.M. Neklyudov**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.I. Gordienko**, NAS RB academician (Belarus); **G. Duca**, NAS Moldova academician (Moldova); **M.I. Iolov**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **A.E. Erkebayev**, NAS Kyrgyzstan academician (Kyrgyzstan); **V.I. Velichkin**, RAS corr.member (Russia); **Marek Sikorski**, Doctor of Chemistry, prof. (Poland); **V.A. Potapov**, Doctor of Engineering, prof. (Ukraine); **Harun Parlar**, Doctor of Biological Sciences, prof. (Germany); **Gao Endzhun**, prof. (PRC); **Stefano Perni**, Doctor of Philosophy, prof. (UK); **Boguslava Leska**, dr, prof. (Poland); **Pauline Prokopovich**, Doctor of Philosophy, prof. (UK); **Wójcik Waldemar**, prof. (Poland), **Nur Izura Udzir**, prof. (Malaysia), **V.N. Narayev**, Doctor of Chemistry, prof. (Russia)

Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

ISSN 2224-5227

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5540-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of.219-220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

<http://nauka-nanrk.kz/> reports-science.kz

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

SELF-ORGANIZATION LAWS OF ROAD ASPHALT PAVEMENT LOW TEMPERATURE CRACKING

B.B. Teltayev

Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Kazakhstan

bagdatbt@yahoo.com

Key words: Road asphalt pavement, low temperature cracking, self-organization, critical temperature, initial cooling temperature, cooling rate.

Abstract: In the present work, road asphalt pavement during the cooling in negative temperatures field is considered as an open nonlinear thermodynamic system. Pavement separation into smaller size blocks during the cracking is explained as a result of collective behavior (self-organization) of structural elements of pavement material in critical conditions (when reaching the critical temperature). The blocks formed after pavement cracking are offered to consider as a specific dissipative structures, which are adaptation forms to external conditions. For quantitative estimates of collective behavior of asphalt concrete as a viscoelastic material proposed to use its relaxation function. It is hypothesized that under low temperature cracking temperature crack in the initial block of road asphalt pavement appears in a cross section, that in the formed blocks total unrealized strain energy at the moment of crack are equal. As a result of experimental and numerical researches it is established that the first critical temperature during cooling of road asphalt pavement depends linearly on temperature and does not depend on cooling rate.

УДК 625.7/.8:691.16

ЗАКОНОМЕРНОСТИ САМООРГАНИЗАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ДОРОЖНОГО АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

Б.Б. Телтаев

Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан

bagdatbt@yahoo.com

Ключевые слова: Дорожное асфальтобетонное покрытие, низкотемпературное растрескивание, самоорганизация, критическая температура, начальная температура охлаждения, скорость охлаждения.

Аннотация: В настоящей работе дорожное асфальтобетонное покрытие при охлаждении в области отрицательных температур рассматривается как открытая нелинейная термодинамическая система. Разделение покрытия на блоки меньших размеров при растрескивании объясняется положениями синергетики как результат коллективного поведения (самоорганизации) структурных элементов материала покрытия в критических условиях (при достижении критических температур). Образованные после растрескивания покрытия блоки предлагается рассматривать как специфические диссипативные структуры, являющиеся формами адаптации системы к внешним условиям. Для количественных оценок коллективного поведения асфальтобетона как вязкоупругого материала предложено пользоваться его функцией релаксации. Выдвинута гипотеза о том, что при низкотемпературном растрескивании температурная трещина в начальном блоке дорожного асфальтобетонного покрытия появляется в таком поперечном сечении, что в образуемых блоках суммарные нереализованные энергии деформации в момент растрескивания равны. В результате экспериментально-численного исследования установлено, что первая критическая температура при охлаждении дорожного асфальтобетонного покрытия линейно зависит от начальной температуры охлаждения и не зависит от скорости охлаждения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературное растрескивание 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 распределяющая нагрузка 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.

Чтобы устранить отрицательное влияние низкотемпературных трещин, на практике дорожного дела обычно используется способ их заделки, включающий расшитие и заполнение полости трещины вязким битумом или специальной мастикой [7]. Заделка трещин представляет собой трудоемкий и маломеханизированный вид работы, требующий значительные затраты материала и времени. Стоимость заделки трещин растет, естественно, с увеличением количества трещин.

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 [27-30].

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

1. Почему количество низкотемпературных трещин увеличивается из года в год?
2. Чем можно объяснить примерно равные расстояния между ними?
3. Как можно спрогнозировать их количество, т.е. расстояние между ними?
4. Существует ли предельно наибольшее их количество, т.е. предельно наименьшее расстояние между ними?
5. Как связаны их количественные характеристики с показателями погодных-климатических условий местности?
6. Можно ли найти такой материал для дорожного покрытия, при использовании которого не появляются низкотемпературные трещины или их количество будет существенно меньше по сравнению с традиционными видами асфальтобетона?
7. Какие конструктивные и технологические меры можно предпринять, чтобы полностью или частично предотвратить появление низкотемпературных трещин? и др.

В настоящей работе предлагаются теоретические положения для объяснения низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия, которые основаны на современных представлениях термодинамики открытых систем и используют элементы теории бифуркации [8-10]. В объяснении растрескивания ключевое положение занимает понятие самоорганизации (коллективное поведение) структурных элементов (атомов, молекул, ионов, макромолекул, надмолекулярных образований) асфальтобетонного покрытия. Предлагается для количественной характеристики явления самоорганизации пользоваться функцией релаксации

напряжения в асфальтобетоне и используется наследственная теория вязкоупругости, основанная на известном принципе суперпозиции Больцмана [1-3].

2. РЕЛАКСАЦИЯ И КОЛЛЕКТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Если образец вязкоупругого материала мгновенно (практически очень быстро) растянуть до определенной величины деформации ε и затем поддержать неизменной эту деформацию, т.е. $\varepsilon = const$, то проявляется явление релаксации, заключающееся в самопроизвольном уменьшении напряжения в образце [1-3]. В курсах механики о явлении релаксации говорится только о том, что она происходит из-за теплового рассеяния энергии. Физика полимеров объясняет, что явление релаксации в вязкоупругом материале, каким являются полимеры, обусловлено процессами рекомбинации структурных элементов [4-6].

Явление релаксации напряжения в вязкоупругих материалах проявляется и при других видах нагружения. Если образец такого материала деформировать в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, предшествующие к моменту наблюдения t , то напряжение $\sigma(t)$, наблюдаемое в момент времени t , зависит не только от деформации в момент наблюдения t , но и от всех деформаций $\varepsilon(\tau_1), \varepsilon(\tau_2), \dots, \varepsilon(\tau_n)$, полученных образцом в предшествующие моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. В соответствии с принципом суперпозиции Больцмана для нестирающего материала имеем [2]:

$$\sigma(t) = R(t - \tau_1) \cdot \varepsilon(\tau_1) + R(t - \tau_2) \cdot \varepsilon(\tau_2) + \dots + R(t - \tau_n) \cdot \varepsilon(\tau_n). \quad (1)$$

Для случая непрерывного деформирования вместо выражения (1) имеем интегральное уравнение:

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t - \tau) d\varepsilon(\tau), \quad (2)$$

где $R(t - \tau)$ - функция релаксации вязкоупругого материала.

Зависимость реакции вязкоупругих материалов от истории деформирования (нагружения) заставляет специалистов говорить об их «механической памяти», т.е. о способности «помнить» (или «забывать») что произошло в предшествующие моменты. В явлении релаксации напряжения «запоминающая» способность вязкоупругого материала характеризуется функцией релаксации $R(t)$. Так, один из классиков механики академик Работнов Ю.Н. в известном курсе «Механика деформируемого твердого тела» [1, стр. 576] пишет, что «ядро наследственности (функция релаксации - Телтаев Б.) характеризует степень «забывания» к моменту времени t о тех воздействиях, которые были совершены в момент времени τ . Поэтому, если свойства материала со временем не меняются, то естественно предположить, что мера «памяти» и «забывания» зависит от разности $t - \tau$ ». А в монографии [2, стр. 17] функция ползучести вязкоупругого материала $P(t - \tau)$, характеризующая величину деформации $\varepsilon(t)$ в момент времени t от напряжения $\sigma(\tau)$, приложенного в предшествующий момент времени τ , названа «функцией памяти».

В теории упругости [11, 12] упругое тело (материал) характеризуется следующими показателями: E - модуль (продольной) упругости; G - модуль сдвига; ν - коэффициент поперечной деформации (Пуассона) и B - объемный модуль.

Эти показатели между собой связаны следующим выражением:

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (3)$$

Из выражения (3) становится понятным, что если приложить нагрузку к упругому телу в продольном направлении, то его продольный размер увеличится, а поперечный - уменьшится и изменится объем тела. Другими словами, при оказании воздействия на упругое тело, реагирует весь объем этого тела.

Аналогичное выражение справедливо и для вязкоупругого тела, но с тем изменением, что все

показатели зависят от времени:

$$B(t) = \frac{E(t)}{3[1 - 2\nu(t)]}, \quad (4)$$

где $E(t)$ и $B(t)$ - продольный и объемный модули релаксации вязкоупругого тела (материала);

$\nu(t)$ - функция времени, показывающая по аналогии с коэффициентом Пуассона относительную величину поперечной деформации.

Из выражения (4) видно, что аналогично с упругим телом, любое воздействие на вязкоупругое тело, оказанное в любой момент времени, вызывает реакцию всего объема этого тела.

С учетом того, что вязкоупругое тело обладает «механической памятью», можно сказать о том, что историю нагружения (деформирования) любой точки (части) вязкоупругого тела «помнит» весь объем этого тела. Иначе говоря, процесс деформирования вязкоупругого тела – это результат коллективного поведения всех его структурных элементов.

В дальнейших исследованиях будем считать, что реакция дорожного асфальтобетонного покрытия к температурному воздействию при низких и близких к низким температурах является результатом коллективного поведения всех его структурных элементов. Еще одним важным аргументом сказанному выше является то, что во время охлаждения асфальтобетонное покрытие на большой длине автомобильной дороги, включающей десятки, даже сотни километров, находится практически в одинаковых (однородных) условиях теплового воздействия.

3. САМООРГАНИЗАЦИЯ

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 [10]. Возникновение диссипативных структур объясняется явлением самоорганизации, в основе которой лежит явление коллективного поведения структурных элементов системы.

В настоящей работе образование блоков при низкотемпературном растрескивании дорожного асфальтобетонного покрытия из-за охлаждения воздуха предлагается рассматривать как специфические диссипативные структуры.

Для определенности в дальнейшем введем новый термин «начальный блок дорожного асфальтобетонного покрытия» (сокращенно «начальный блок»). Начальным блоком считается участок дорожного асфальтобетонного покрытия, отделенный от смежных участков какими-либо (обычно технологическими) швами, имеющимися в пределах всей толщины и всей ширины дорожного покрытия.

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

На практике дорожного строительства расстояние между технологическими швами составляет примерно 800-1200 м. Такая большая длина начального блока дает основания принимать его в рассуждениях и расчетах бесконечным.

В бесконечном начальном блоке при охлаждении воздуха возникает нереализованная температурная деформация ε_T , из-за которой появляется напряжение σ_T . Реализации температурной деформации препятствуют смежные участки начального блока. При продолжающемся охлаждении величина температурного напряжения непрерывно растет. Температура все время снижается, т.е. релаксирующая способность асфальтобетона все больше

уменьшается. Как было сказано раньше, из-за коллективного поведения весь объем асфальтобетона в начальном блоке совместно сопротивляется к внешнему воздействию. Иначе говоря, все структурные элементы асфальтобетона начального блока (атомы, молекулы, макромолекулы, надмолекулярные образования) сопротивляются предстоящему возможному разрушению (потерю сплошности, целостности) коллективно (совместно).

При критическом значении управляющего параметра, которым является температура воздуха (считаем, что температуры поверхности покрытия и воздуха в зимний период равны), начальный блок дорожного асфальтобетонного покрытия как термодинамическая система достигает порога устойчивости, который характеризуется следующим условием:

$$\sigma_T = [\sigma_P], \quad (5)$$

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 начальный блок однородный, 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.

Для определения положения низкотемпературной трещины в начальном блоке выдвигается следующая гипотеза.

Гипотеза: При низкотемпературном растрескивании температурная трещина в начальном блоке дорожного асфальтобетонного покрытия появляется в таком поперечном сечении, что в образуемых блоках суммарные нереализованные энергии деформации в момент растрескивания равны.

Высказанную гипотезу можно принять за критерий и написать в следующем виде:

$$\int_{V_1} \sigma_T(\varepsilon_T) \cdot \varepsilon_T(T) dv = \int_{V_2} \sigma_T(\varepsilon_T) \cdot \varepsilon_T(T) dv, \quad (6)$$

где σ_T - температурное напряжение;

ε_T - нереализованная температурная деформация;

T - температура;

V_1, V_2 - объемы образованных первого и второго блоков покрытия соответственно.

В качестве параметра бифуркации принимается длина начального блока ℓ . Бифуркационная диаграмма растрескивания начального блока показана на рисунке 1.

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 растрескивании 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 [10].

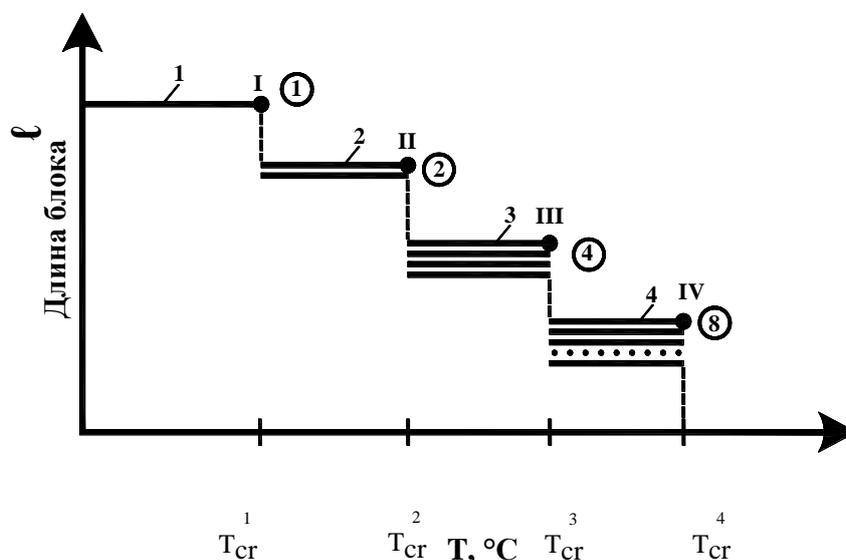


Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма:

T - температура покрытия – параметр бифуркации (управляющий параметр); T_{cr}^1 , T_{cr}^2 , T_{cr}^3 и T_{cr}^4 - критические значения параметра бифуркации; - число блоков покрытия; 1, 2, 3 - термодинамические ветви; I, II, III и IV – точки бифуркации

При первичном растрескивании начальный блок 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 1). Можно предположить, что число температурных трещин на дорожном асфальтобетонном покрытии увеличивается пропорционально количеству последовательных критических температур, имевших место за период службы.

Из изложенного выше становится ясным, что в основе низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия лежит явление самоорганизации его структурных элементов и образованные блоки являются специфической диссипативной структурой, возникшей как форма адаптации системы к режиму охлаждения воздуха в конкретных погодноклиматических условиях.

4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ

4.1. Материалы

Для дальнейшего рассмотрения принят часто используемый в Казахстане мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б марки I, приготовленный с применением битума марки БНД-90/130, удовлетворяющий требованиям стандарта Казахстана СТ РК 1373-2005 [13]. Основные стандартные показатели битума даны в таблице 1. Битум был произведен Павлодарским нефтехимическим заводом из сырой нефти Западной Сибири (Россия) способом прямого окисления.

Таблица 1. Основные стандартные показатели битума

Показатель	Единица измерения	Требования СТ РК 1773-2005	Значение
Пенетрация, 25 °С,	100 гр, 5	0,1 мм	91-130
			98

с			
Индекс пенетрации	-	-1,0... +1,0	-0,96
Растяжимость: - 25 °С - 0 °С	см	≥ 65 ≥ 4,0	139 5,5
Температура размягчения	°С	≥ 43	45,3
Температура хрупкости	°С	≤ -20	-24,6
Динамическая вязкость, 60 °С	Па·с	≥ 75	174,2
Кинематическая вязкость	мм ² /с	≥ 180	409,0

Горячий плотный асфальтобетон по стандарту Казахстана СТ РК 1225-2003 [14] 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).

Содержание битума в асфальтобетоне составляет 4,8 % по массе сухого минерального материала. Основные стандартные показатели щебня по стандарту СТ РК 1284-2004 [15] и асфальтобетона по стандарту СТ РК 1225-2003 [14] представлены в таблицах 2 и 3 соответственно. Кривая гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона показана на рисунке 2.

Таблица 2. Основные стандартные показатели щебня

Показатель	Единица измерения	Требование СТ РК 1284-2004	Значение	
			фракция 5-10 мм	фракция 10-20 мм
Средняя плотность	г/см ³	-	2,55	2,62
Содержание игловатых и лещадных зерен	%	≤ 25	13	9
Содержание пылеватых и глинистых частиц	%	≤ 1,0	0,3	0,2
Сцепление с битумом	-	-	удовл.	удовл.
Водонасыщение	%	-	1,93	0,90

Таблица 3. Основные стандартные показатели асфальтобетона

Показатель	Единица измерения	Требования СТ РК 1225-2003	Значение
Средняя плотность	г/см ³	-	2,39
Водонасыщение	%	1,5-4,0	2,3
Пористость минеральной части	%	≤ 19	14
Пористость асфальтобетона	%	2,5-5,0	3,8
Прочность при сжатии: - 0 °С - 20 °С - 50 °С	МПа	≤ 13,0 ≥ 2,5 ≥ 1,3	7,3 3,4 7,3
Водостойкость	-	≥ 0,85	0,92
Сдвигоустойчивость	МПа	≥ 0,38	0,40
Трещиностойкость	МПа	4,0-6,5	4,1

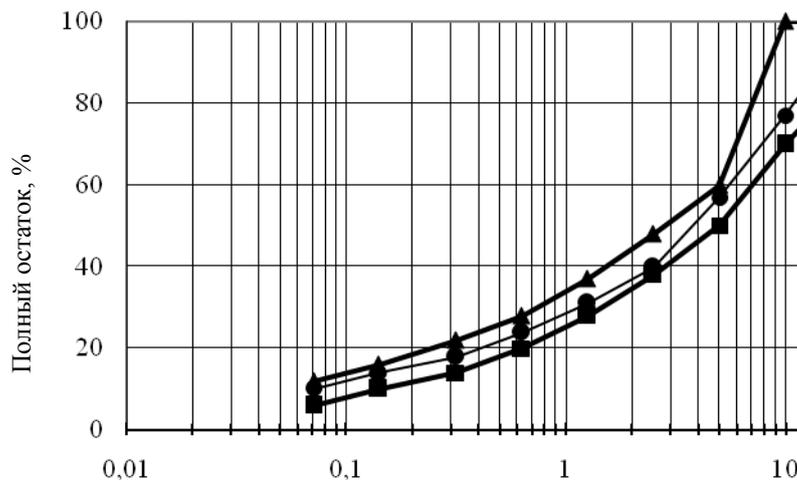


Рисунок 2. Кривая гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона

4.2. Температурное напряжение

В процессе образования блоков дорожного асфальтобетонного покрытия при низкотемпературном растрескивании одним из ключевых характеристик является (низко-) температурное напряжение. Дорожные специалисты считают, что температурные трещины на асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог возникают из-за невозможности свободного деформирования (сжатия) покрытия в горизонтальном направлении при понижениях температуры. Свободно деформироваться любому участку сплошного асфальтобетонного покрытия препятствуют его соседние участки. Величину нереализованной температурной деформации в асфальтобетонном покрытии в момент времени t можно определить по выражению:

$$\varepsilon_T(t) = \alpha [T(t) - T_0], \quad (7)$$

где, α - коэффициент линейного температурного деформирования асфальтобетона, $1/^\circ\text{C}$;

T_0 - начальная температура охлаждения воздуха, $^\circ\text{C}$;

$T(t)$ - температура в момент времени t .

В настоящей работе асфальтобетонное покрытие рассматривается как стержень бесконечной длины, лежащий на сплошном однородном основании, между которыми отсутствует трение. Температуру асфальтобетонного покрытия будем характеризовать её значением на поверхности покрытия, т.е. температурой воздуха.

Изменение температуры во времени задается выражением

$$T(t) = T_0 - \frac{1}{3600} \cdot k \cdot t, \quad (8)$$

где, k - скорость понижения температуры, $^\circ\text{C}/\text{ч}$;

t - время, с.

Как уже было отмечено, асфальтобетон является типичным вязкоупругим материалом, механические свойства которого зависят от длительности действия нагрузки и температуры [16-18]. Поэтому температурное напряжение в асфальтобетонном покрытии можно определять с помощью следующего интегрального уравнения линейной теории вязкоупругости [19]:

$$\sigma_T(t) = \int_0^t E(t - \tau) d\varepsilon_T(\tau), \quad (9)$$

где, $E(t)$ - функция релаксации асфальтобетона;

t - момент времени, в котором вычисляется напряжение $\sigma_T(t)$;

τ - параметр интегрирования;

$\varepsilon_T(\tau)$ - нереализованная температурная деформация в асфальтобетонном покрытии.

4.3. Функция релаксации асфальтобетона

Выше было предложено для количественной характеристики явления самоорганизации структурных элементов дорожного асфальтобетонного покрытия пользоваться функцией релаксации асфальтобетона. В настоящее время известны как чисто экспериментальные, так и экспериментально-аналитические методы определения функции релаксации асфальтобетона. Одним из часто используемых исследователями и практиками является модель Витчака (M.W. Witzak), включенная в действующее американское Руководство по механико-эмпирическому проектированию новых и реабилитируемых конструкций дорожных одежд [20]. Она представляет собой следующую корреляционную зависимость:

$$\begin{aligned} \log|E^*(f)| = & -1,249937 + 0,029232 \cdot P_{200} - 0,001767 \cdot (P_{200})^2 - 0,002841 \cdot P_4 - \\ & - 0,058097 \cdot V_a - 0,802208 \cdot \left(\frac{V_{\text{beff}}}{V_{\text{beff}} + V_a} \right) + \\ & + \frac{3,871977 - 0,0021 \cdot P_4 + 0,003958 \cdot P_{38} - 0,00017 \cdot (P_{38})^2 + 0,00547 \cdot P_{34}}{1 + \exp[-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) - 0,393532 \cdot \log(\eta)]}, \quad (10) \end{aligned}$$

где, $|E^*(f)|$ - абсолютное значение комплексного модуля асфальтобетона

при частоте f , 10^5 psi (фунт на квадратный дюйм);

η - вязкость битума, 10^6 пз;

f - частота нагружения, Гц;

V_a - содержание воздушных пор, %;

V_{beff} - эффективное содержание битума, %;

P_{34} , P_{38} , P_4 - суммарные остатки на ситах размером 19 мм, 9,5 мм, 4,75 мм соответственно, %;

P_{200} - полный проход через сито размером 0,075 мм, %.

В представленной модели температурная зависимость вязкости битума описывается по формуле:

$$\log \log(\eta) = A + VTS \cdot \log(T_R), \quad (11)$$

где η - вязкость битума, спз;

T_R - температура, градус в температурной шкале Ренкина;

VTS - параметр температурной чувствительности вязкости битума;

A - параметр регрессии.

Путем определения динамической вязкости битума с помощью вакуумного вискозиметра при температурах 40, 50, 60, 70, 80 и 90 °С по стандарту Казахстана СТ РК 1211-2003 [31] было найдено: $A = 10,997$, $VTS = 3,689$.

Из кривой гранулометрического состава асфальтобетона было найдено, что: $P_{34} = 0$ %, $P_{38} = 18$ %, $P_4 = 39$ % и $P_{200} = 11,25$ %.

Объемные показатели асфальтобетона были определены по методике [21]: $V_a = 3,79$ % и $V_{\text{beff}} = 9,87$ %.

Переход от комплексного модуля асфальтобетона при частоте нагружения f (Гц) к релаксационному модулю при длительности действия нагрузки t (с) был осуществлен по способу Ван дер Поля [22], согласно которому связь между f и t имеет вид

$$f = \frac{1}{2\pi t} \quad (12)$$

Переход от температуры в шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) к температуре в шкале Ренкина ($^{\circ}\text{R}$) осуществляется по формуле

$$T_{\text{R}} = \frac{9}{5} T_{\text{C}} + 491,67 \quad (13)$$

Графики функции релаксации принятого вида асфальтобетона при нескольких отрицательных температурах показаны на рисунке 3. Как видно, в области низких температур релаксирующая способность асфальтобетона существенно зависит как от температуры, так и от длительности действия нагрузки. Но следует заметить, что с понижением температуры релаксирующая способность асфальтобетона сильно уменьшается и область чисто упругого деформирования увеличивается.

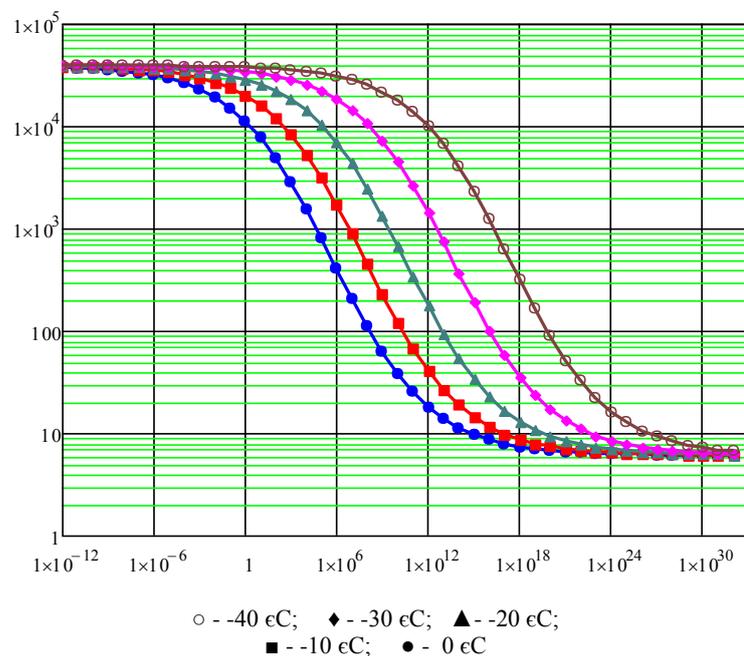


Рисунок 3. Функция релаксации асфальтобетона при разных температурах

4.4. Прочность асфальтобетона при растяжении

В соответствии с критерием (5) низкотемпературное растрескивание асфальтобетонного покрытия имеет место тогда, когда накопленное напряжение достигает прочности асфальтобетона при растяжении.

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) (рисунок 4). Испытания были выполнены в соответствии с требованиями стандарта EN 12697-46 [23] при температурах 20, 10, 0, -10, -20 и -30 $^{\circ}\text{C}$. Образцы для испытания были изготовлены путем разрезания асфальтобетонных плит, приготовленных секторным уплотнителем по стандарту EN 12697-33 [24]. 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 5. Зависимость имеет сложный характер. В интервале температуры от +20 $^{\circ}\text{C}$ до -10 $^{\circ}\text{C}$ прочность асфальтобетона повышается с увеличивающейся скоростью. В интервале температуры от -10 $^{\circ}\text{C}$ до -20 $^{\circ}\text{C}$ прочность также

повышается, но с меньшей скоростью, чем в первом интервале. Максимальная прочность имеет место при температуре -20°C и равна $6,2\text{ МПа}$. С дальнейшим понижением температуры до -30°C прочность быстро падает и составляет $4,3\text{ МПа}$. Самое резкое снижение прочности получено в интервале температуры от -10°C до 0°C . Так, в начале этого интервала прочность имела значение, равное $5,6\text{ МПа}$, а в его конце – всего лишь $2,3\text{ МПа}$. Иными словами, в указанном интервале повышение температуры на 10°C вызвало снижение прочности асфальтобетона в $2,43$ раза.



Рисунок 4. Испытательная система TRAVIS

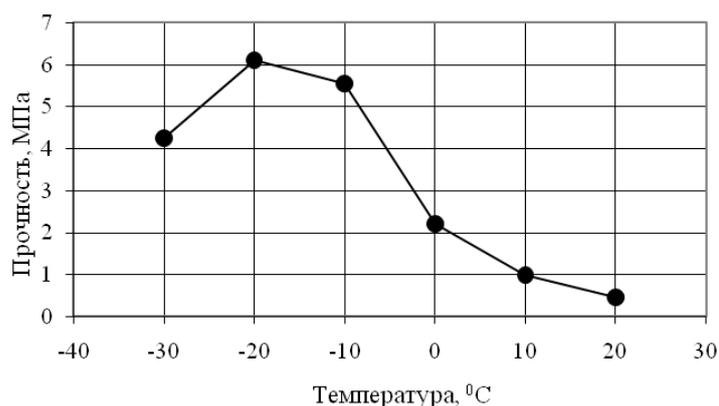


Рисунок 5. Зависимость прочности асфальтобетона при растяжении от температуры

4.5. Характеристики охлаждения воздуха

Результаты анализа многолетних данных об изменениях температуры воздуха в зимний период в холодных регионах Казахстана показали, что часто имеет место резкое понижение температуры. Температура воздуха может опуститься в отдельные годы до -40°C и ниже. Характер изменения температуры и минимальное её значение в разные годы могут быть разными. В качестве примера на рисунке 6 приведены два графика изменения температуры воздуха по данным метеорологической станции в г. Астана: первый из них показывает изменение температуры воздуха в январе 2006 года, а второй - в том же месяце 2009 года. Как видно, январь 2006 года оказался существенно холоднее, чем январь 2009 года. Так, в 2009 году температура воздуха в январе опускалась до -26°C и в пределах $-22^{\circ}\text{C} \dots -26^{\circ}\text{C}$ за весь этот месяц температура была отмечена 8 раз. А в январе 2006 года минимальная температура воздуха опустилась почти до -40°C и почти в течение половины месяца температура имела значение, ниже -26°C .

В результате статистической обработки характерных показателей температуры воздуха, в частности, в г. Астане было установлено, что:

- в 78 случаях из 100 резкое охлаждение воздуха начинается с $0 \dots -16^{\circ}\text{C}$ (рисунок 7);
- скорость охлаждения воздуха изменяется в широких пределах (от $0,1^{\circ}\text{C/ч}$ до $1,9^{\circ}\text{C/ч}$); в 33 случаях из 100 скорость охлаждения составляет $0,5-0,7^{\circ}\text{C/ч}$, а в 88 случаях

находится в пределах от 0,3 °С/ч до 1,1 °С/ч (рисунок 8);

- в большинстве случаев (30 %) минимальная температура при охлаждении воздуха доходит до -20...-24 °С, а в 72 случаях из 100 она находится в пределах от -16 °С до -28 °С; только в 1 случае из 100 минимальная температура достигла -40 °С (рисунок 9);

- продолжительность охлаждения воздуха изменяется в очень широких пределах (от 9 до 66 часов); наиболее часто (26 %) она составляет 18 часов и в 65 случаях из 100 находится в пределах от 12 до 18 часов; охлаждения с продолжительностью от 21 до 27 часов составляют 4-7 % (суммарно 17 %), а с продолжительностью от 30 до 66 часов – 1-3 % (суммарно 14 %) (рисунок 10).

На рисунке 11 показана связь между скоростью и продолжительностью охлаждения воздуха. Как видно, охлаждения с одинаковой продолжительностью могут иметь существенно разные скорости охлаждения и при одинаковых скоростях охлаждения их продолжительности могут быть существенно разными. При этом пределы изменения скорости охлаждения с увеличением продолжительности охлаждения сужаются. Так, при продолжительности охлаждения 9-12 часов она колеблется в пределах 0,5-1,9 °С/ч, а при продолжительности 42 часов составляет 0,3-0,6 °С/ч.

В работе автора [19] для климатических условий г. Астаны было установлено, что между максимальной скоростью понижения температуры (охлаждения) воздуха и максимальной продолжительностью при одиночных (разовых) понижениях температуры существует надежная корреляционная связь следующего вида:

$$k = 2.3263 - 0.0639 \cdot T_{np \max} + 0.00053 \cdot T_{np \max}^2, \quad (14)$$

$$R^2 = 0.998,$$

где, k - скорость охлаждения воздуха, °С/ч;

$T_{np \max}$ - максимальная продолжительность охлаждения, ч.

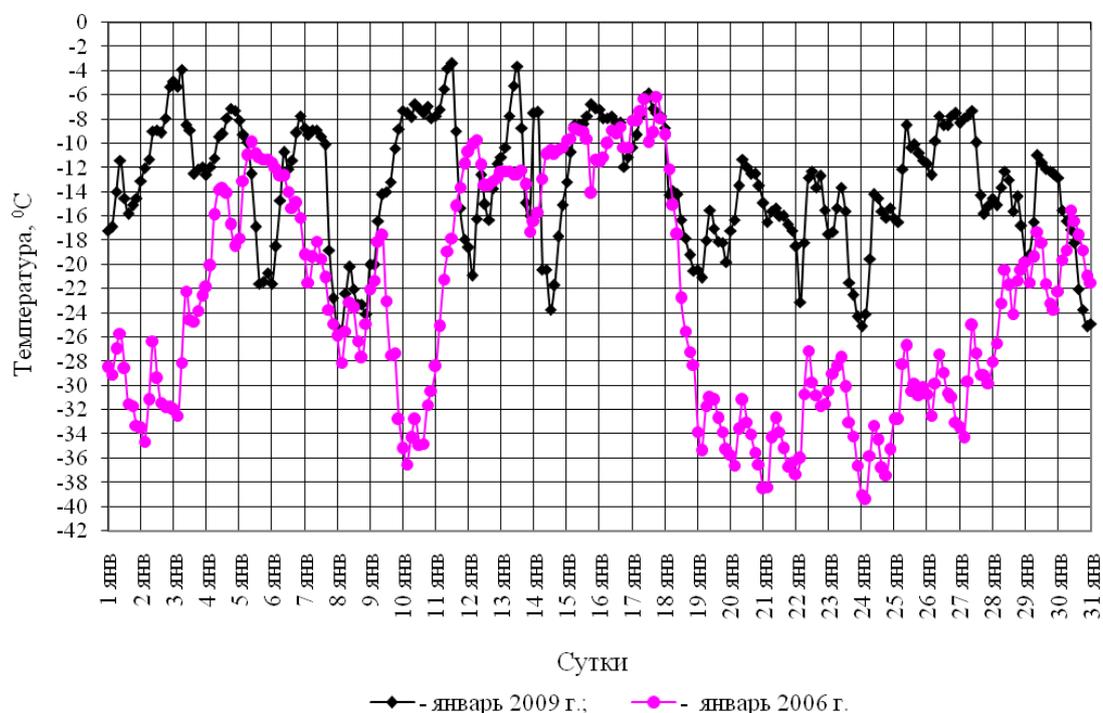


Рисунок 6. Изменение температуры воздуха в г. Астана

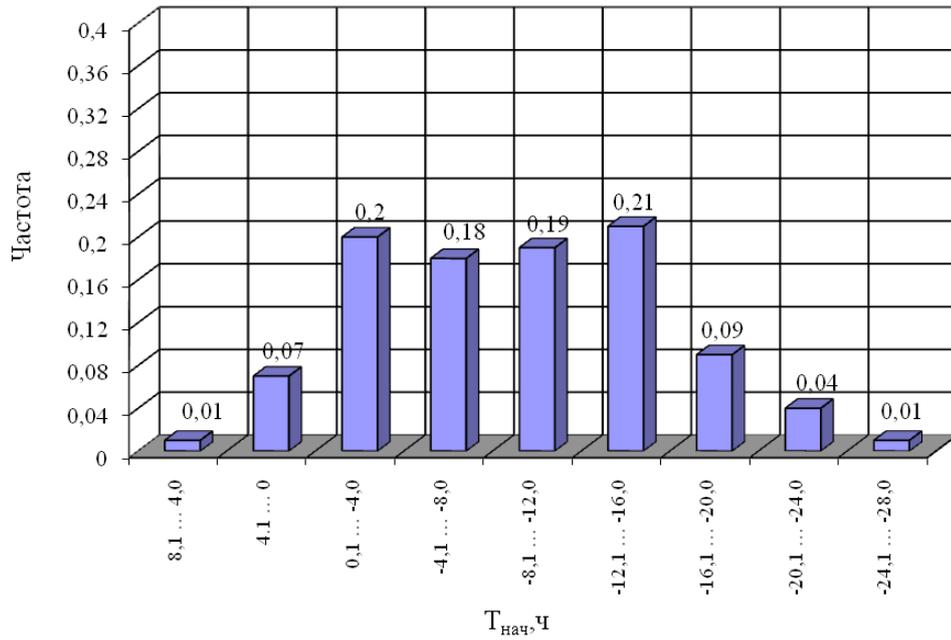


Рисунок 7. Гистограмма распределения начальной температуры охлаждения воздуха (Т_{нач}, °С) по данным метеостанции г. Астаны (2006-2011 гг.)

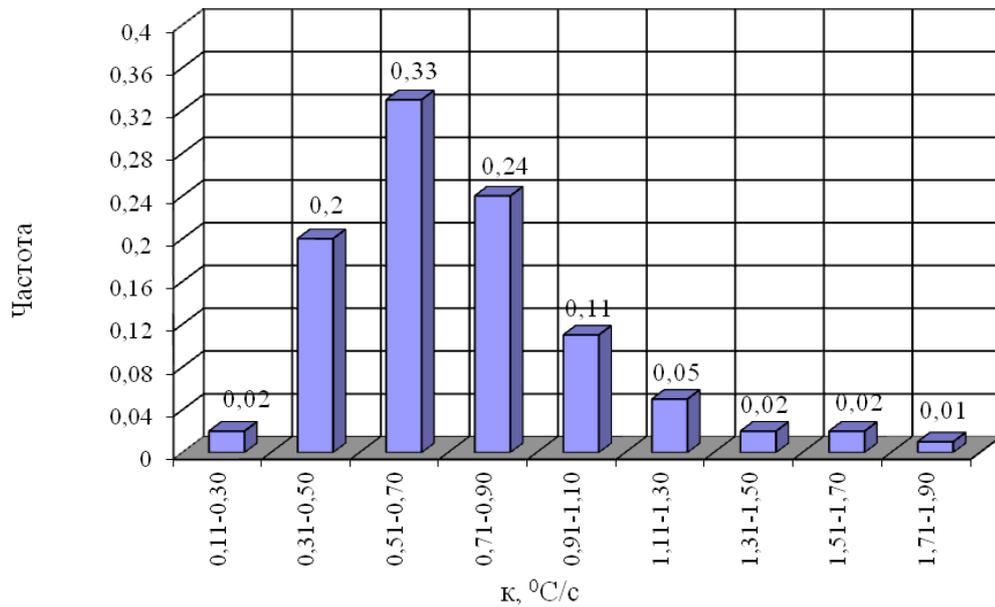


Рисунок 8. Гистограмма распределения скорости охлаждения воздуха по данным метеостанции г. Астаны (2006-2011 гг.)

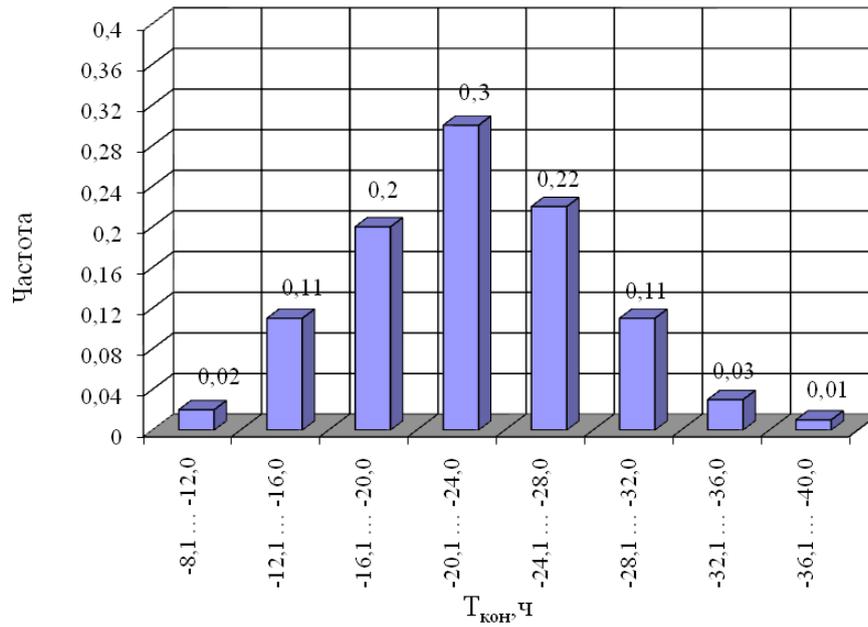


Рисунок 9. Гистограмма распределения конечной температуры охлаждения воздуха (Т_{кон.}, °C) по данным метеостанции г. Астаны (2006-2011 гг.)

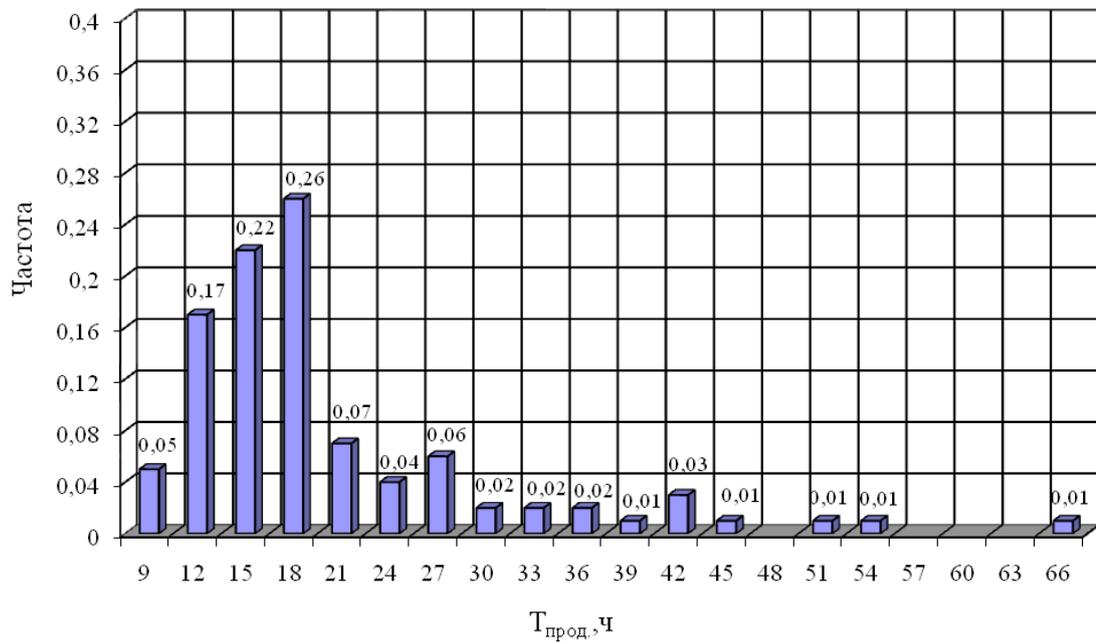


Рисунок 10. Гистограмма распределения продолжительности охлаждения (Т_{прод.}, ч) по данным метеостанции г. Астаны (2006-2011 гг.)

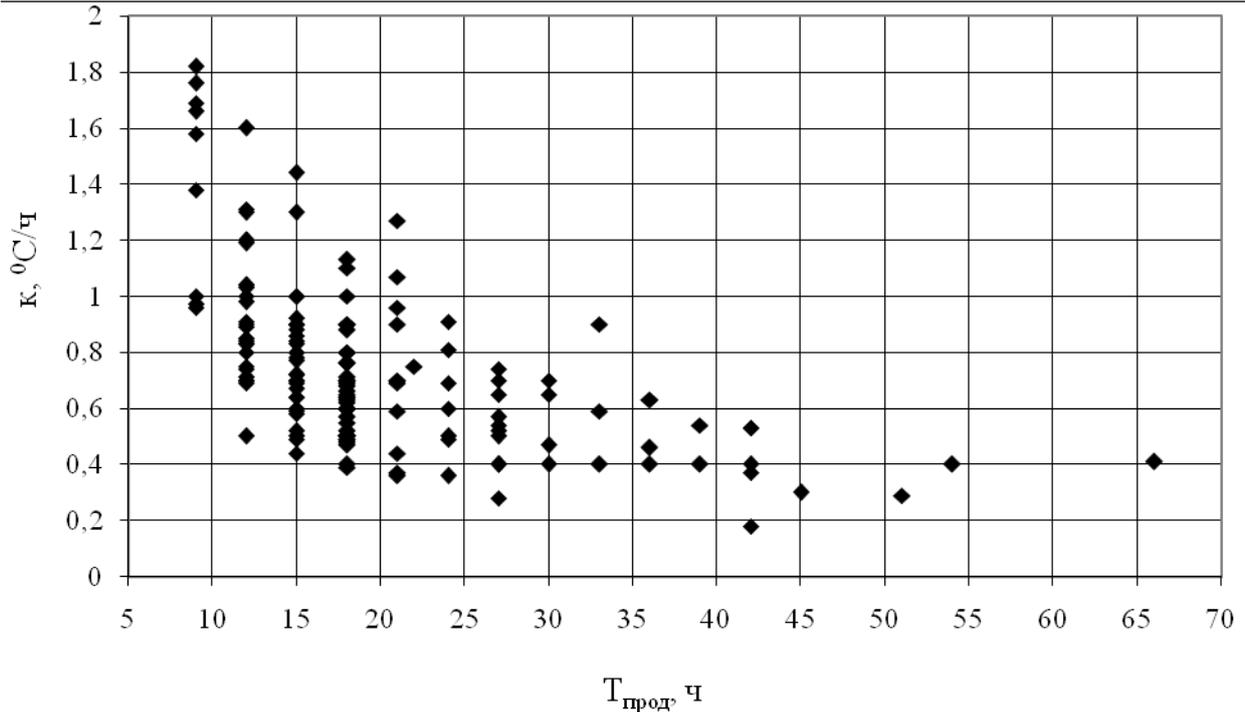


Рисунок 11. Связь между скоростью и продолжительностью охлаждения воздуха по данным метеостанции г. Астаны (2006-2011 гг.)

4.6. Расчет температурного напряжения

Результаты расчета и анализа температурного напряжения в дорожном асфальтобетонном покрытии с применением аппарата линейной теории вязкоупругости в частных случаях охлаждения воздуха были опубликованы в работах [19, 25, 26]. В настоящей работе определение температурного напряжения и условия образования блоков рассмотрены в широких пределах изменения начальной температуры (20, 10, 0, -10, -20 °С), скорости (0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0 °С/ч) и продолжительности (до 70 ч) охлаждения, основываясь на результатах анализа характеристик понижения температуры воздуха в центральном и северном регионах Казахстана.

На рисунках 12 и 13 представлены графики изменения во времени нереализованной температурной деформации и температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения 10 °С. Видно, что величины нереализованной деформации и напряжения сильно зависят как от продолжительности, так и от скорости охлаждения. Но следует отметить, что при изменении (увеличении) температуры и, как следствие, нереализованной деформации линейно, при всех рассмотренных скоростях охлаждения напряжение изменяется (увеличивается) нелинейно. Нелинейность растет с увеличением как продолжительности, так и скорости охлаждения.

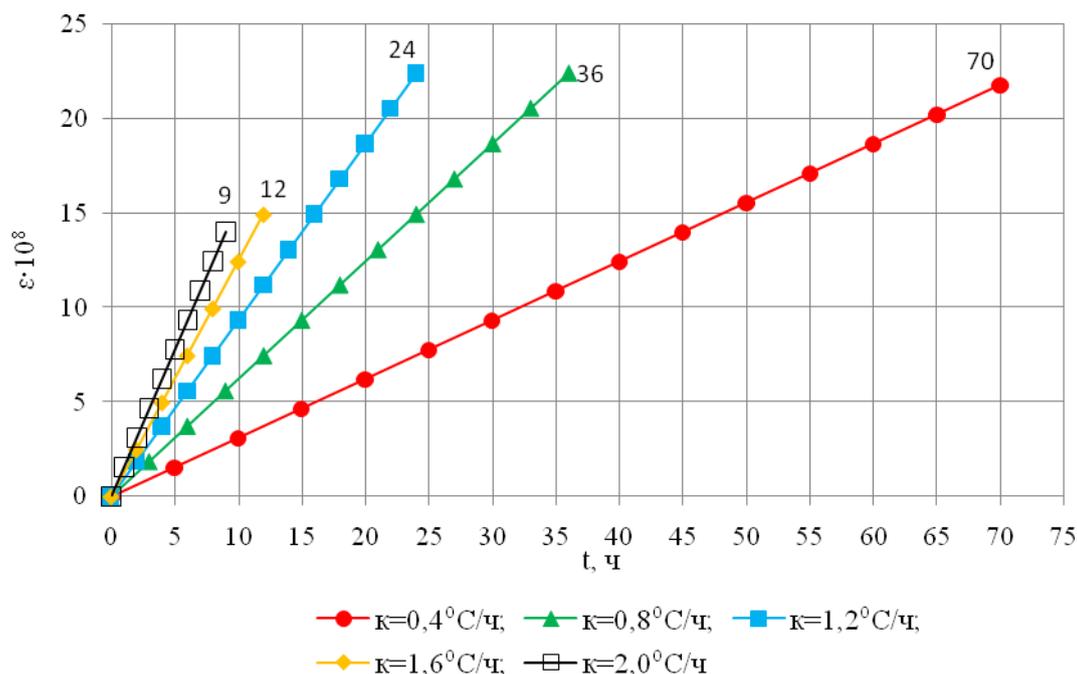


Рисунок 12. Нереализованная температурная деформация асфальтобетонного покрытия при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = 10^\circ\text{C}$

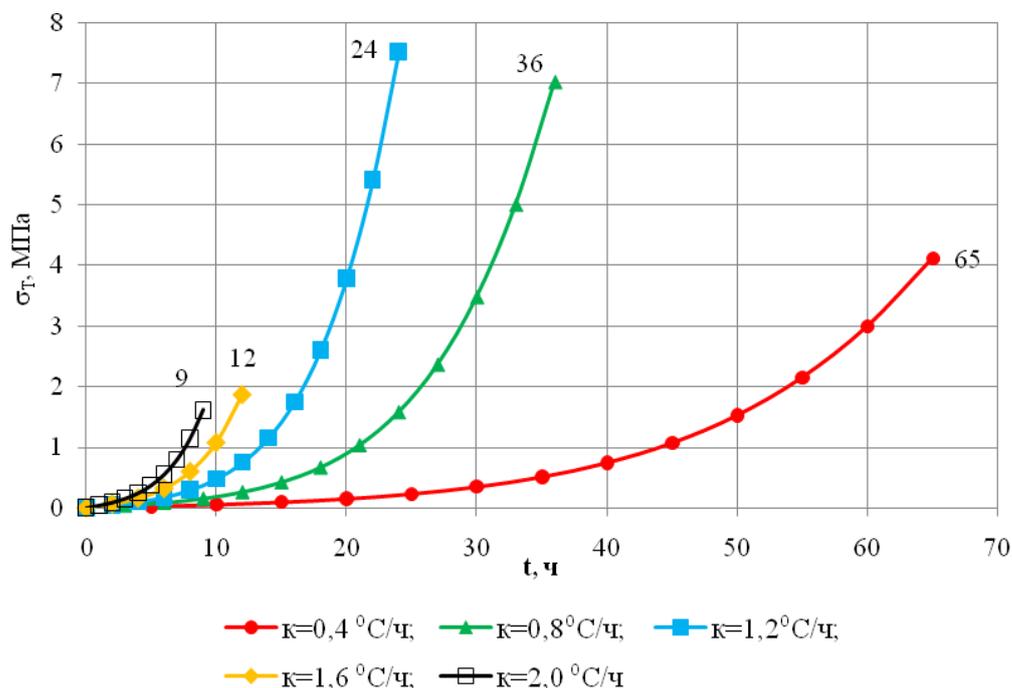


Рисунок 13. Температурное напряжение в асфальтобетонном покрытии при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = 10^\circ\text{C}$

Зависимость температурного напряжения от нереализованной температурной деформации при разных скоростях охлаждения и рассматриваемой температуре охлаждения показана на рисунке 14. Как следовало ожидать, зависимости оказались существенно нелинейными при больших значениях деформации. Можно считать, что до деформации, равной 10^{-7} ($10 \cdot 10^{-8}$), и

соответственно до напряжения, равной 0,5-0,7 МПа, зависимости линейны и практически не зависят от скорости охлаждения. С увеличением деформации и напряжения зависимости между ними приобретают нелинейный характер и начинает влиять скорость охлаждения. Так, при больших деформациях в пределах от $18 \cdot 10^{-8}$ до $22 \cdot 10^{-8}$ повышение скорости охлаждения от 0,4 до 2,0 °С/ч вызывает рост напряжения до 2,0 МПа.

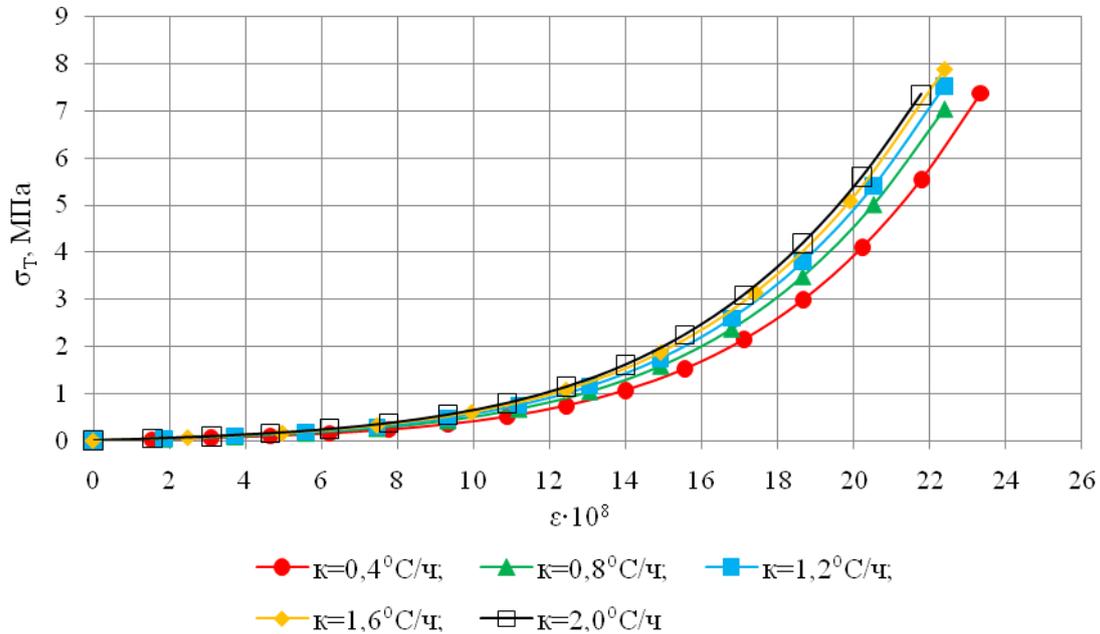


Рисунок 14. Зависимость температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии от нереализованной деформации при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = 10$ °С

На рисунках 15-17 показаны графики изменения нереализованной температурной деформации и температурного напряжения, а также зависимости температурного напряжения от нереализованной температурной деформации при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения -20 °С. Как видно, и в этом случае линейному изменению деформации во времени (рисунок 15) соответствует нелинейное изменение напряжения во времени (рисунок 16), но при всех скоростях охлаждения нелинейность изменения напряжения существенно меньше, чем в приведенном выше случае, когда начальная температура охлаждения была равна 10 °С. Существенное уменьшение нелинейности также имеет место в зависимостях между напряжениями и деформациями (рисунок 17).

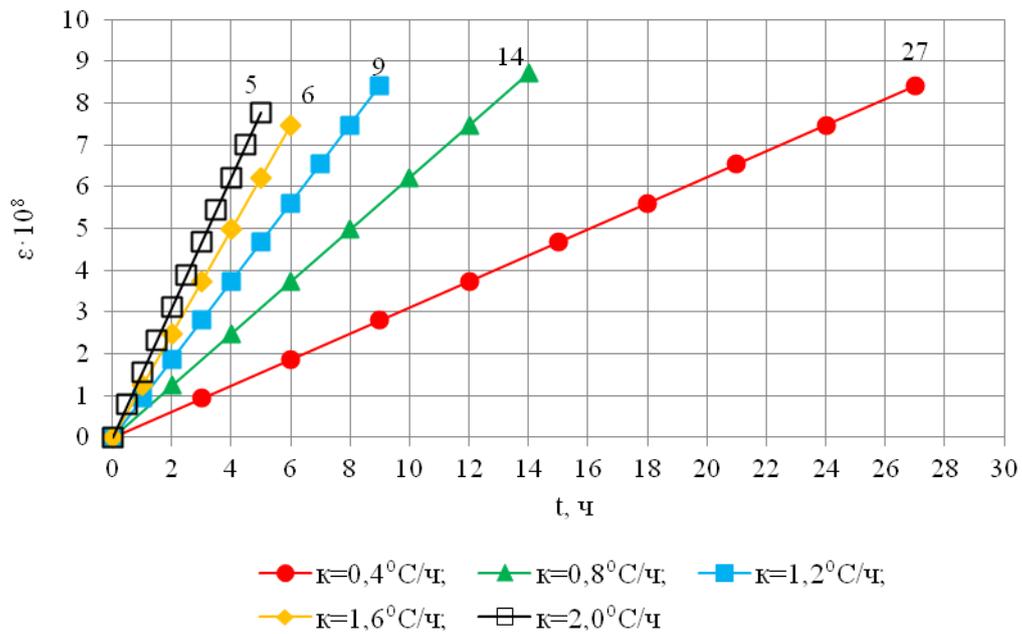


Рисунок 15. Нереализованная температурная деформация асфальтобетонного покрытия при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = -20^{\circ}\text{C}$

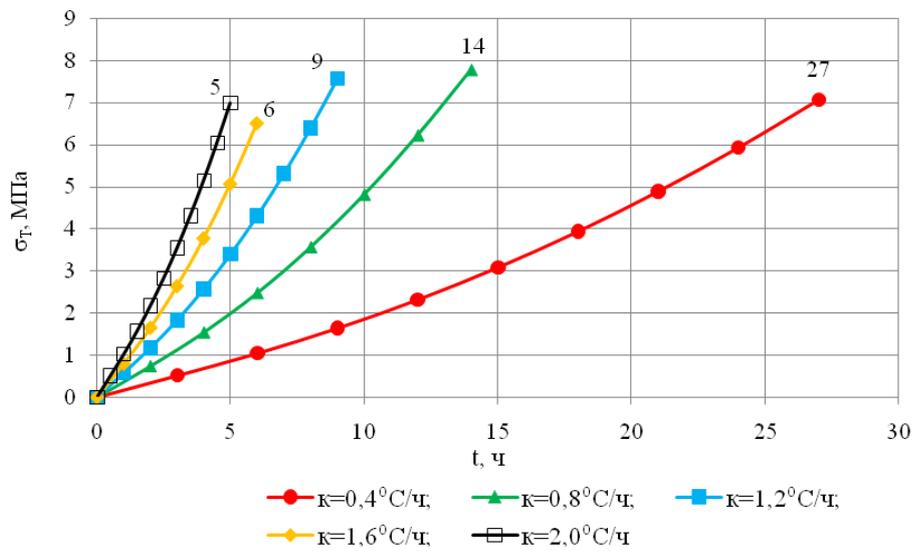


Рисунок 16. Температурное напряжение в асфальтобетонном покрытии при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = -20^{\circ}\text{C}$

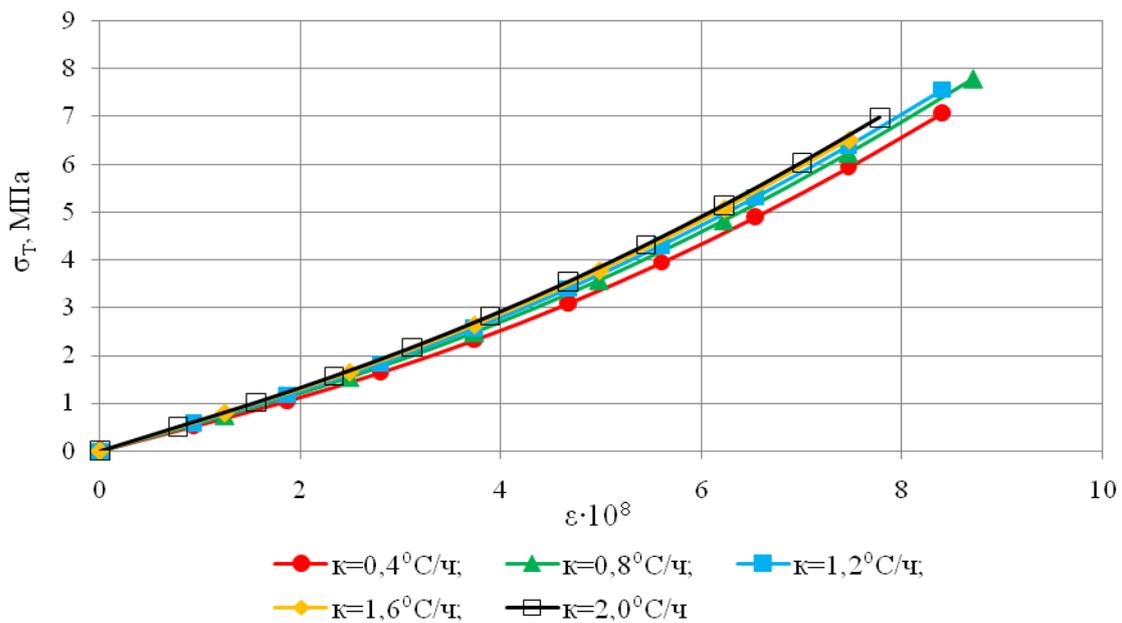


Рисунок 17. Зависимость температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии от нереализованной деформации при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = -20$ °C

На рисунке 18 приведены графики, показывающие увеличение температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии с понижением температуры при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения 10 °C. На эти графики наложена зависимость прочности асфальтобетона при растяжении от температуры, представленная ранее на рисунке 5. Такая комбинация графиков позволяет найти важные показатели появления трещин на асфальтобетонном покрытии. Так, опустив вертикальную линию с точки пересечения графиков на горизонтальную ось, можно найти критическую температуру T_{cr} , при которой появляется температурная трещина на покрытии. Проводив горизонтальную линию с точки пересечения графиков, на вертикальной оси можно определить критическое напряжение σ_{cr} , при котором возникают температурные трещины. Зная значения критического напряжения, из графиков на рисунках 13 и 16 можно определить значения критического времени t_{cr} при разных скоростях охлаждения. Критическое время показывает, через какое время с начала охлаждения появляется температурная трещина на покрытии.

На рисунке 18 можно видеть, что не все графики напряжения пересекаются с графиком прочности асфальтобетона. Так получается по той причине, что из-за высокой релаксирующей способности асфальтобетона даже при длительной продолжительности охлаждения величина накопленного температурного напряжения не достигает предела прочности.

Аналогичные графики для случаев охлаждения с начальной температуры -20 °C представлены на рисунке 19. На этом рисунке видно, что когда охлаждения начинаются с низкой температуры быстро достигаются критические условия.

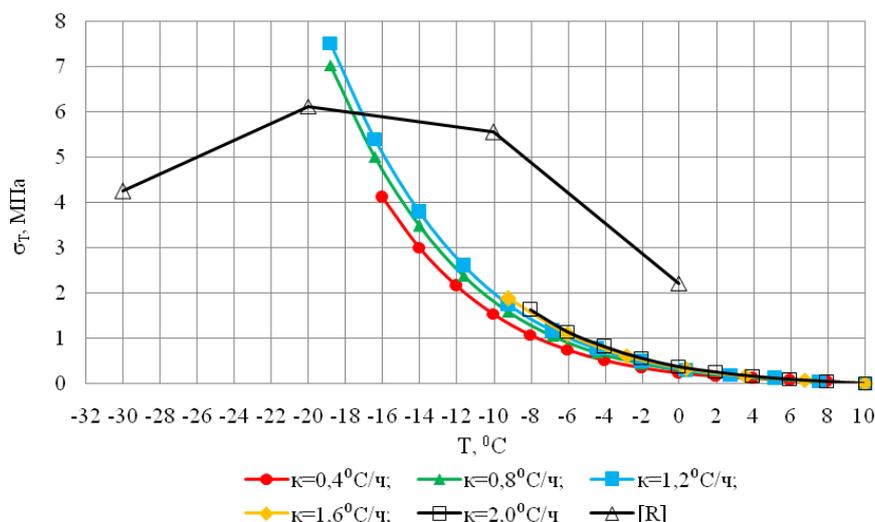


Рисунок 18. Зависимость температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии от температуры при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения 10 °С

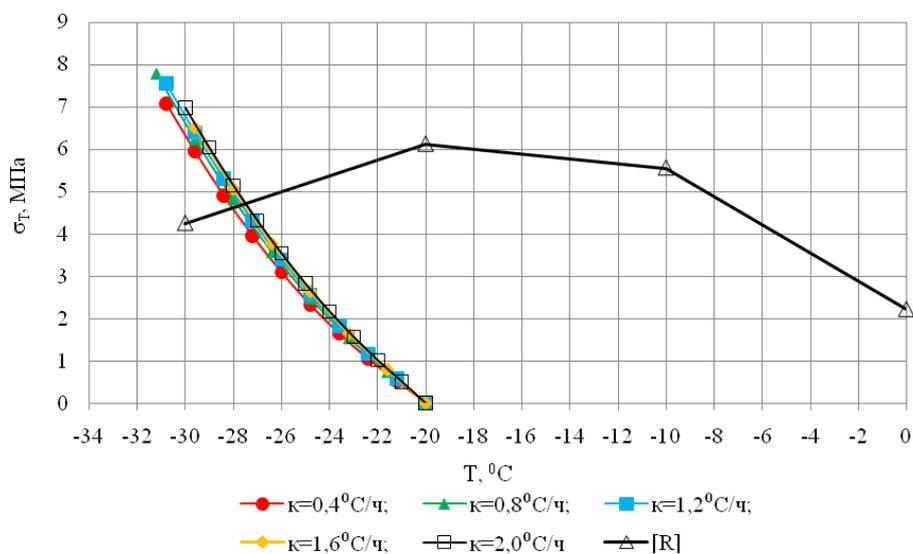


Рисунок 19. Зависимость температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии от температуры при разных скоростях охлаждения и начальной температуре охлаждения $T_0 = -20$ °С

Полученные изложенными выше способами значения критических напряжения, времени, температуры и других характеристик растрескивания асфальтобетонного покрытия даны в таблице 4, а в таблице 5 – их средние значения и пределы изменения. Таблицы не содержат данные, относящиеся к случаям понижения температуры с 20 °С, так как в этих условиях накопленные напряжения настолько малы, что состояния асфальтобетонного покрытия очень далеки от критических.

Критическая накопленная энергия представляет собой удельную энергию, накопленную в единице объема покрытия к моменту его растрескивания, и вычислена по выражению:

$$W_{cr} = \int_0^{\varepsilon_{cr}} \sigma_T(\varepsilon_T) \cdot \varepsilon_T(T) d \varepsilon_T. \quad (15)$$

Критическое охлаждение определено по формуле:

$$\Delta T_{cr} = k \cdot t_{cr}. \quad (16)$$

ТАБЛИЦЫ 4 и 5

Из таблицы 4 видно, что при рассмотренных начальных температурах охлаждения значения всех характеристик, кроме критического времени, практически не зависят от скорости охлаждения. А критическое время сокращается с повышением скорости охлаждения и понижением начальной температуры охлаждения.

Построенные по данным таблицы 5 для наглядного представления зависимости средних характеристик низкотемпературного растрескивания асфальтобетонного покрытия от начальной температуры охлаждения показаны на рисунках 20-24. Из этих рисунков можно установить, что:

- при охлаждениях с температур в пределах от 10 °С до 0 °С критическое напряжение имеет постоянное значение 6,0-6,1 МПа и с понижением начальной температуры охлаждения уменьшается линейно;

- зависимость критической энергии от начальной температуры охлаждения имеет сложный характер: при охлаждениях с температур от 10 °С до 0 °С величина критической энергии растет и с понижением начальной температуры охлаждения уменьшается по нелинейному закону; уменьшение критической энергии с понижением начальной температуры можно объяснить тем, что в области низких отрицательных температур критическое состояние покрытия достигается тем быстрее, чем ниже температура и накапливается все меньше энергии; уменьшение критической энергии с повышением начальной температуры охлаждения (левее $T_0 = 0$ °С) обусловлено повышением релаксирующей способности асфальтобетона с увеличением температуры;

- критические температура, деформация и величина охлаждения линейно зависят от начальной температуры охлаждения.

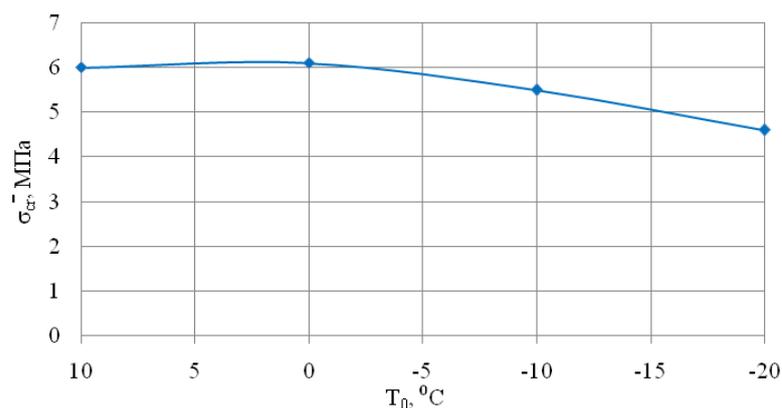


Рисунок 20. Зависимость среднего критического напряжения от начальной температуры охлаждения

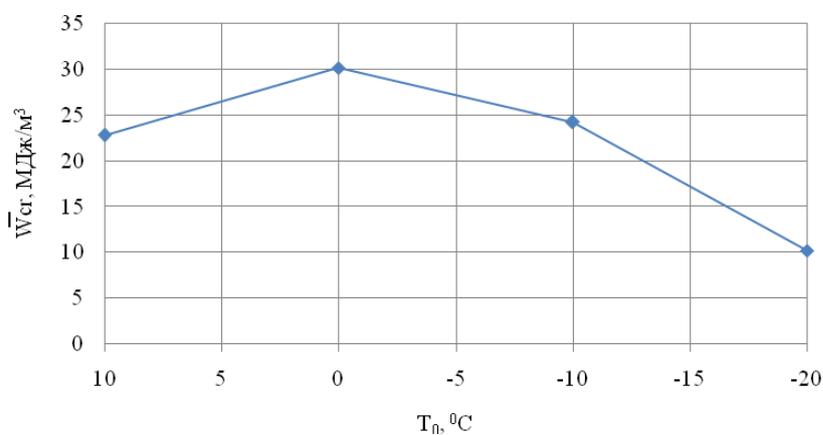


Рисунок 21. Зависимость средней критической накопленной энергии от начальной температуры охлаждения

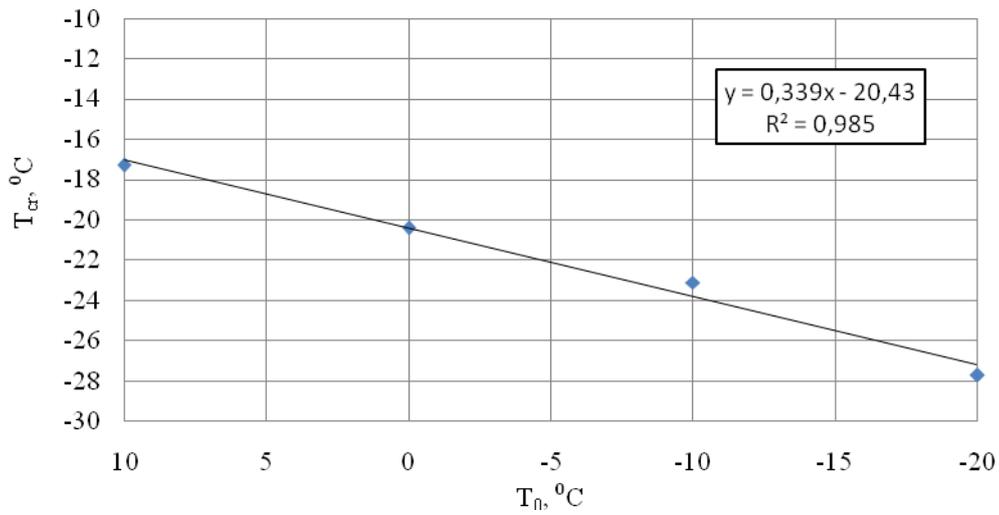


Рисунок 22. Зависимость средней критической температуры от начальной температуры охлаждения

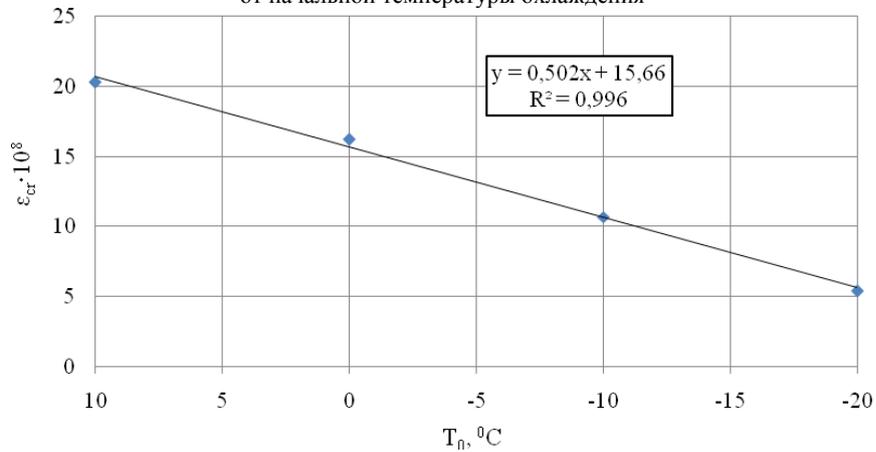


Рисунок 23. Зависимость средней критической нереализованной деформации от начальной температуры охлаждения

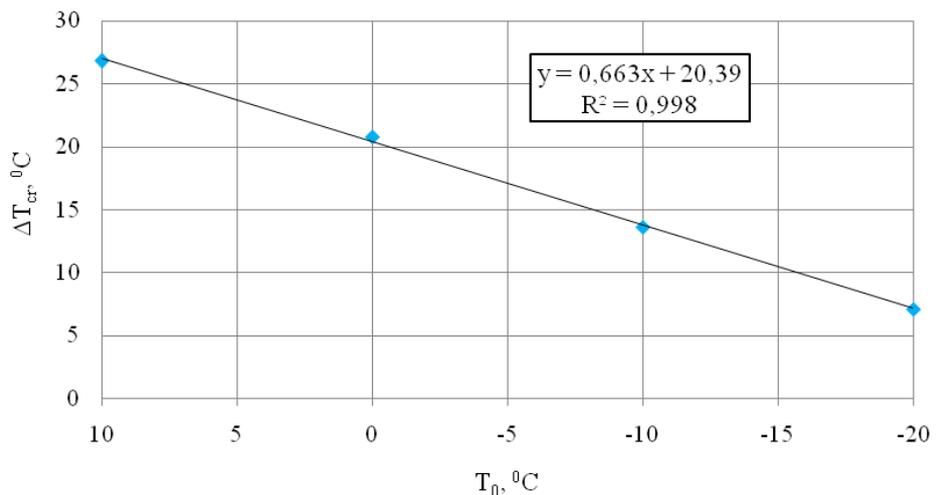


Рисунок 24. Зависимость средней величины критического охлаждения от начальной температуры охлаждения

В реальных дорожных условиях во время охлаждения воздуха невозможно осуществить непосредственное измерение температурного напряжения, нереализованной деформации и

накопленной энергии. Поэтому из числа указанных характеристик наиболее приемлемым для определения (прогноза) времени растрескивания дорожного покрытия является критическая температура.

Следует отметить, что температура при охлаждении воздуха (покрытия) является, как было указано выше, управляющим параметром и ее критические значения есть точки бифуркации, при которых происходит растрескивание асфальтобетонного покрытия. Поэтому установленная закономерность, заключающаяся в том, что критическая температура при охлаждении дорожного асфальтобетонного покрытия линейно зависит от начальной температуры охлаждения и не зависит от скорости охлаждения, имеет важное научное и практическое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотренный процесс образования блоков в асфальтобетонном покрытии при охлаждении воздуха как результат коллективного поведения (самоорганизации) структурных элементов (атомов, молекул, макромолекул, надмолекулярных образований) материала покрытия в критических условиях (при достижении критических температур), а блоков в асфальтобетонном покрытии – как специфические диссипативные структуры, являющиеся формами адаптации системы к внешним условиям, основаны на современных представлениях синергетики.

2. При понижении температуры, следовательно, увеличении нереализованной температурной деформации по линейному закону накопленное температурное напряжение в асфальтобетонном покрытии растет по нелинейному (степенному) закону. Зависимость температурного напряжения от нереализованной температурной деформации также является нелинейной. Эти факты являются основанием, чтобы дорожное асфальтобетонное покрытие при охлаждении считать нелинейной термодинамической системой.

3. Установлена неизвестная ранее закономерность – первая критическая температура при охлаждении дорожного асфальтобетонного покрытия линейно зависит от начальной температуры охлаждения и не зависит от скорости охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
- [2] Ильин В.П., Мальцев Л.Е., Соколов В.Г. Расчет строительных конструкций из вязкоупругих материалов. – Л.: Стройиздат, 1991. – 190 с.
- [3] Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высшая школа. – 279 с.
- [4] Бартев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983. – 391 с.
- [5] Бартев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
- [6] Тагер А.А. Физико-химия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
- [7] ПР РК 218-29-03. Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог. – Астана, 2003. – 336 с.
- [8] Базаров И.П. Термодинамика. – С-Петербург: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.
- [9] Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985.
- [10] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
- [11] Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1961. – 538 с.
- [12] Хан Х. Теория упругости. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
- [13] СТ РК 1373-2005. Битумы и битумные вяжущие. Битумы нефтяные дорожные вяжущие. Технические условия. – Астана, 2005.
- [14] СТ РК 1225-2003. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – Астана, 2003.
- [15] СТ РК 1284-2004. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – Астана, 2004.
- [16] Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. Second Edition. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River. New Jersey. 2004. – 775 p.
- [17] Papagiannakis A.T., Masad E.A. Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons Inc. New Jersey. 2008. – 542 p.
- [18] Yoder E.J., Witczak M.W. Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons Inc. New Jersey. 1975. – 736 p.
- [19] Teltayev B. Evaluation of Low Temperature Cracking Indicators of Hot Mix Asphalt Pavement // International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 7, № 5, 2014. – P. 343-351.
- [20] ARA, Inc, ERES Consultants 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.

- [21]. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th Edition. Asphalt Institute. 2007. – 788 p.
- [22]. Van der Poel C.A. General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data. Journal of Applied Chemistry, 1954. Vol. 4. P. 221-237.
- [23]. EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. – 2004.
- [24]. EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. - 2003.
- [25]. Teltayev B., Kaganovich Ye. Evaluating the Low Temperature Resistance of the Asphalt Pavement under the Climatic Conditions of Kazakhstan. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Mechanisms, Modeling, Testing, Detection, Prevention and Case Histories. Volume 1. Springer, 2012. Pp. 211-221.
- [26]. 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.
- [27]. Сюньи Г.К. О причинах образования температурных трещин на городских асфальтобетонных покрытиях и мерах их предупреждения. – Киев: Госстройиздат, 1955. – 23 с.
- [28]. Сюньи Г.К. Дорожный асфальтобетон. – Киев: Госстройиздат, 1962. – 236 с.
- [29]. Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E. Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. Vol. 34. 1965, pp. 248-285.
- [30]. Hilles J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. Vol. 35. 1966, pp. 292-309.
- [31]. СТ РК 1211-2003. Битумы и битумные вяжущие. Метод определения динамической вязкости. - Астана, 2003.

REFERENCES

- [1]. Rabotnov Y.N. Mechanics of deformable solid. Moscow, Science, 1988. - 712 p. (in Russ.).
- [2]. Ilyn V.P., Maltsev L.E., Sokolov V.G. Calculation of construction structures from viscoelastic materials. Leningrad, Stroizdat, 1991. – 190 p. (in Russ.).
- [3]. Coltunov M.A. Creep and relaxation. Moscow, High school. – 279 p. (in Russ.).
- [4]. Bartenev G.M., Zelenev Y.V. Physics and mechanics of polymers. Moscow, High school, 1983. – 391 p. (in Russ.).
- [5]. Bartenev G.M. Strength and failure mechanism of polymers. Moscow, Chemistry, 1984. – 280 p. (in Russ.).
- [6]. Tager A.A. Physics and chemistry of polymers. Moscow, Chemistry, 1978. – 544 p. (in Russ.).
- [7]. PR RK 218-29-03. Technical specification on roads maintenance. Astana, 2003. – 336 p. (in Russ.).
- [8]. Bazarov I.P. Thermodynamics. Saint-Petersburg, Publisher “Lan”, 2010. – 384 p. (in Russ.).
- [9]. Prigogine I. From being to becoming. Moscow, Science, 1985. (in Russ.).
- [10]. Prigogine I., Stengers I. Order out of chaos: Man’s new dialogue with nature. Moscow, Progress, 1986. – 432 p. (in Russ.).
- [11]. Bezuchov N.I. Basics of theory of elasticity, plasticity and creep. Moscow, High school, 1961. - 538 p. (in Russ.).
- [12]. Han H. Theory of elasticity. Moscow, Mir, 1988. – 344 p. (in Russ.).
- [13]. ST RK 1373-2013. Bitumens and bitumen binders. Oil road viscous bitumens. Technical specifications. Astana, 2005. (in Russ.).
- [14]. ST RK 1225-2003. Hot mix asphalt for roads and airfields. Technical specifications. Astana, 2003. (in Russ.).
- [15]. ST RK 1284-2004. Crushed stone and gravel of dense rock for construction works. Technical specifications. Astana, 2004. (in Russ.).
- [16]. Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. Second Edition. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River. New Jersey. 2004. – 775 p. (in Eng.).
- [17]. Papagiannakis A.T., Masad E.A. Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons Inc. New Jersey. 2008. – 542 p. (in Eng.).
- [18]. Yoder E.J., Witczak M.W. Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons Inc. New Jersey. 1975. – 736 p. (in Eng.).
- [19]. Teltayev B. Evaluation of Low Temperature Cracking Indicators of Hot Mix Asphalt Pavement // International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 7, № 5, 2014. – P. 343-351. (in Eng.).
- [20]. ARA, Inc, ERES Consultants 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.).
- [21]. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th Edition. Asphalt Institute. 2007. – 788 p. (in Eng.).
- [22]. Van der Poel C.A. General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data. Journal of Applied Chemistry, 1954. Vol. 4. P. 221-237. (in Eng.).
- [23]. EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. – 2004. (in Eng.).
- [24]. EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. - 2003. (in Eng.).
- [25]. Teltayev B., Kaganovich Ye. Evaluating the Low Temperature Resistance of the Asphalt Pavement under the Climatic Conditions of Kazakhstan. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Mechanisms, Modeling, Testing, Detection, Prevention and Case Histories. Volume 1. Springer, 2012. Pp. 211-221. (in Eng.).

- [26]. 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.).
- [27]. Syuni G.K. About reasons of temperature cracking on urban asphalt pavements and ways of its prevention. Kiev, Gosstroyizdat, 1955. – 23 p. (in Russ.).
- [28]. Syuni G.K. Road asphalt concrete. Kiev, Gosstroyizdat, 1962. – 236 p. (in Russ.).
- [29]. Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E. Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. Vol. 34. 1965, pp. 248-285. (in Eng.).
- [30]. Hilles J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. Vol. 35. 1966, pp. 292-309. (in Eng.).
- [31]. ST RK 1211-2003. Bitumens and bitumen binders. Method of dynamic viscosity determination. Astana, 2003. (in Russ.).

ЖОЛ АСФАЛЬТБЕТОН ЖАМЫЛҒАСЫНЫҢ ТӨМЕНГІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ЖАРЫЛУЫНДАҒЫ ӨЗ БЕТІНШЕ ҰЙЫМДАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

Б.Б.Телтаев

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

Тірек сөздер: Жол асфальтбетон жамылғысы, төменгі температуралық жарылу, өз бетінше ұйымдасу, критикалық температура, бастапқы суу температурасы, суу жылдамдығы.

Аннотация: Бұл жұмыста жол асфальтбетон жамылғысы теріс температураларда суығанда сызықтық емес ашық термодинамикалық жүйе түрінде қарастырылады. Жамылғының жарылғанда кіші өлшемді блоктарға бөлінуі синергетиканың заңдылықтары негізінде жамылғы материалының құрылымдық элементтерінің критикалық жағдайларда (критикалық температурадағы) ұжымдық сипатының (өз бетінше ұйымдасуы) нәтижесі ретінде түсіндіріледі. Жамылғының жарылуынан кейін пайда болған блоктарды жүйенің сыртқы жағдайларға бейімделу формалары болып табылатын ерекше диссипативтік құрылымдар деп қарастыру ұсынылады. Асфальтбетонның тұтқыр-серпімді материал ретінде ұжымдық сипатын сандық мөлшермен бағалау үшін оның релаксация функциясын пайдалану ұсынылған. «Төменгі температуралық жарылуда температуралық жарық жол асфальтбетон жамылғысының бастапқы блогында жарылу мезетінде пайда болатын блоктардағы жыйынтық деформациялық энергиялары тең болатын көлденең кимада пайда болады» деген гипотеза жасалған. Тәжірибелік-сандық зерттеу нәтижесінде жол асфальтбетон жамылғысы суығандағы бірінші критикалық температураның бастапқы суу температурасымен сызықтық байланыста екені және суу жылдамдығына байланысты емес екені анықталды.

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 17.07.2015 г.

**PUBLICATION ETHICS AND PUBLICATION MALPRACTICE
IN THE JOURNALS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.reports-science.kz/index.php/ru/>

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов*
Верстка на компьютере *С.К. Досаевой*

Подписано в печать 11.08.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
15,7 п.л. Тираж 2000. Заказ 4.