

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-481-491>

УДК 625.85.06

Оценка реальных условий эксплуатации и фактических температурных изменений при моделировании состава конструктивных слоев асфальтобетона

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv¹⁾, Лю Тингоу²⁾,
канд. техн. наук, доц. В. Д. Сизов¹⁾, Ли Чжуньюй³⁾, докт. техн. наук, проф. А. В. Бусел⁴⁾,
магистр техн. наук П. П. Яцевич¹⁾, А. А. Афанасенко¹⁾, Хоу Дехуа³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Компания «Хэнань Гаоюань по технологии обслуживания автомагистралей»
(провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),

³⁾Хэнаньская ключевая лаборатория высококачественных технологий диагностики
и обслуживания автомагистралей (провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),

⁴⁾Республиканское дочернее унитарное предприятие «Белорусский дорожный научно-исследовательский
институт «БелдорНИИ» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Все типы усовершенствованных дорожных покрытий работают в экстремальных условиях, с точки зрения воздействия нагрузок и температур. Степень этих влияний моделируется стандартизированными испытаниями, которые воспроизводят, как правило, только нагрузку при постоянной температуре. Основываясь на данных результатах, к материалам конструктивных слоев предъявляются требования, которые не полностью отражают ряд особенностей их работы в дорожном покрытии. Фактически не учитываются основные температурные воздействия и температурно-физические изменения, протекающие в асфальтобетоне, что может привести к недостаточной долговечности и надежности. Эти изменения включают в себя реакции материала на колебания температуры, что может вызвать внутрискруктурные изменения и привести к повышенному трещинообразованию и ухудшению эксплуатационных характеристик. В нашей работе мы провели исследования по определению теплофизических параметров материала верхних конструктивных слоев дорожной одежды, таких как коэффициенты теплопроводности, теплоемкости, теплового расширения (сжатия). Отличительной особенностью наших экспериментов было отслеживание и определение теплофизических показателей в динамике процесса температурных изменений. В статье представлены результаты локальных экспериментальных исследований опытных образцов асфальтобетона по определению коэффициентов теплового линейного расширения, теплопроводности и теплоемкости при заданных перепадах температур. Учитывая важность этих характеристик, необходимо пересмотреть требования к материалам конструктивных слоев с целью обеспечения моделирования реальных условий эксплуатации и учета фактических температурных изменений. Основным результатом проведенных исследований можно считать выработанную методику дальнейшей работы, в которой планируется произвести учет градиента и скорости изменения температур, крупности каменного заполнителя, изменение реологических характеристик в зависимости от изменения температуры. Исследования, представленные в статье, выполнены в рамках проекта сотрудничества белорусских и китайских ученых и специалистов «Студия выдающихся зарубежных ученых по экологически чистым низкоуглеродным технологиям строительства и содержания дорожных покрытий» (грант № GZS2022004).

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, асфальтобетон, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоемкости, коэффициент теплового расширения, градиент температур, реологические характеристики, линейные размеры, стационарный тепловой поток, термическое сопротивление

Для цитирования: Оценка реальных условий эксплуатации и фактических температурных изменений при моделировании состава конструктивных слоев асфальтобетона / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 481–491. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-481-491>

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65,
20113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Evaluation of Real Operating Conditions and Actual Temperature Changes when Modeling the Composition of Asphalt Concrete Structural Layers

B. M. Khroustalev¹⁾, Liu Tingguo²⁾, V. D. Sizov¹⁾, Li Zhongyu³⁾, A. V. Busel⁴⁾, P. P. Yatsevich¹⁾, A. A. Afanasenka¹⁾, Hou Dehua³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd. (Henan, People's Republic of China),

³⁾Henan Key Laboratory of High Grade Highway Detection and Maintenance Technology (Henan, People's Republic of China),

⁴⁾Republican Subsidiary Unitary Enterprise "Belarusian Road Research Institute "BeldorNII" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. All types of improved pavements operate under extreme conditions in terms of loads and temperatures. The degree of these influences is modeled by standardized tests, which, as a rule, reproduce only the load at a constant temperature. Based on these results, requirements are imposed on the materials of structural layers that do not fully reflect a number of features of their performance in road pavements. In fact, the main temperature effects and temperature-physical changes occurring in asphalt concrete are not taken into account, which can lead to insufficient durability and reliability. These changes include the material's response to temperature fluctuations, which can cause infrastructural changes and lead to increased cracking and poor performance. In our work, we conducted research to determine the thermophysical parameters of the material of the upper structural layers of road pavement, such as the coefficients of thermal conductivity, heat capacity, and thermal expansion (compression). A distinctive feature of our experiments was the tracking and determination of thermophysical indicators in the dynamics of the process of temperature changes. The article presents the results of local experimental studies of proto-types of asphalt concrete to determine the coefficients of thermal linear expansion, thermal conductivity and heat capacity at given temperature differences. Given the importance of these characteristics, it is necessary to reconsider the requirements for materials of structural layers in order to ensure that realistic operating conditions are simulated and actual temperature changes are taken into account. The main result of the research can be considered the developed methodology for further work, in which it is planned to take into account the gradient and rate of temperature change, the size of the stone aggregate, and the change in rheological characteristics depending on the temperature change. The research presented in the article was carried out within the framework of the cooperation project between Belarusian and Chinese scientists and specialists "Studio of Outstanding Foreign Scientists on Environmentally Friendly Low-Carbon Technologies for the Construction and Maintenance of Road Pavements" (Grant No GZS2022004).

Keywords asphalt concrete mixture, asphalt concrete, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, heat capacity coefficient, thermal expansion coefficient, temperature gradient, rheological characteristics, linear dimensions, stationary heat flow, thermal resistance

For citation: Khroustalev B. M., Tingguo Liu, Sizov V. D., Zhongyu Li, Busel A. V., Yatsevich P. P., Afanasenka A. A., Dehua Hou (2024) Evaluation of Real Operating Conditions and Actual Temperature Changes when Modeling the Composition of Asphalt Concrete Structural Layers. *Science and Technique*. 23 (6), 481–491. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-481-491> (in Russian)

Введение

Создание дорожных покрытий нежесткого типа, устойчивых к деформациям при высоких температурах, напрямую связано с их способностью предотвращать трещинообразование в зимний период [1, 2]. Это требует сохранения необходимой деформативности (пластичности) при отрицательных температурах [3]. Существенные температурные колебания способствуют образованию поперечных и продольных трещин в асфальтобетонных покрытиях. При этом величина градиента и скорость его нарастания являются критическими значениями [4]. Проблема влияния пониженных температур на трещинообразование остается актуальной.

Согласно существующим расчетам, увеличение транспортной нагрузки требует повышения общего модуля упругости [5], что достигается увеличением толщины или прочности слоев дорожной конструкции. Были зафиксированы случаи появления трещин в покрытиях, которые не подвергались транспортным нагрузкам после укладки [6]. Не учитывается взаимодействие между слоями и их совместимость, включая тепловое расширение, что критично для деформативной способности и устойчивости к трещинам дорожной конструкции.

Коэффициент температурного расширения цементобетона примерно в 20 раз меньше [7], чем у асфальтобетона [8]. Из-за сцепления

между конструктивными слоями, исключаящего их относительное смещение, это различие становится причиной возникновения температурных трещин. В настоящее время дорожные конструкции проектируются с учетом сопротивления растяжению и изгибу, упругого прогиба, осушения, а также воздействия избыточной влаги и сезонного промерзания для обеспечения морозоустойчивости. Однако внешние тепловые воздействия, температурная деформативность строительных материалов и совместимость слоев по температурным характеристикам часто не учитываются.

Появление температурных напряжений, особенно при неравномерном распределении, вызывает температурные деформации [9, 10], способствующие образованию трещин. Величина температурной деформации покрытия зависит от коэффициента температурного расширения, деформативности материала, скорости охлаждения и конечной температуры.

Коэффициент линейного температурного расширения асфальтобетона – это характеристика, определяющая степень изменения линейных размеров материала при изменении температуры [11, 12], выражающаяся в единицах длины на единицу длины на градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Он критически важен для оценки деформативных свойств асфальтобетона, поскольку температурные колебания приводят к значительным деформациям и образованию трещин в дорожном покрытии. Высокий коэффициент указывает на выраженное линейное расширение при температурных изменениях, что необходимо учитывать при проектировании и анализе долговечности дорожных конструкций.

Коэффициент линейного температурного расширения асфальтобетона зависит от вязкости и содержания вяжущего, а также от температуры испытаний. Максимальные значения этого коэффициента наблюдаются в температурном интервале от 0 до -10°C , тогда как минимальные значения фиксируются при температурах ниже -30°C . Сравнительный анализ коэффициентов линейного температурного расширения теплого асфальтобетона при охлаждении и нагреве, проведенный в широком температурном диапазоне (от $+20$ до -50°C), показал, что этот коэффициент всегда выше

при охлаждении, независимо от числа циклов охлаждения.

Исследование циклического изменения температуры (охлаждение–нагрев) в отношении деформаций асфальтобетона выявило разброс значений коэффициентов (до 10 %) при многократных циклах охлаждения и нагрева. При этом зависимости коэффициента от частоты температурных изменений не обнаружено.

Коэффициент теплопроводности асфальтобетона – это параметр, характеризующий теплопередачу материала. Он определяет количество теплоты, передающейся через единичную площадь асфальтобетона при градиенте температуры в один градус Кельвина и выражается в ваттах на метр на кельвин ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) [13]. Данный коэффициент критически важен для анализа тепловых характеристик дорожных покрытий, поскольку: позволяет оценить скорость теплообмена с окружающей средой; влияет на риск образования трещин при изменении температурных условий; определяет поведение материала при различных климатических условиях, что критично для долговечности дорожной конструкции. Коэффициент теплопроводности зависит от составных компонентов асфальтобетона, включая содержание вяжущего и добавок.

Удельная теплоемкость асфальтобетона – это термодинамический параметр, определяющий количество тепловой энергии, необходимое для повышения температуры единицы массы асфальтобетона на один градус Цельсия (или кельвин). Она выражается в джоулях на килограмм на кельвин ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$). Этот показатель позволяет определить, сколько энергии требуется для изменения температуры асфальтобетонного покрытия, что критично при проектировании в условиях переменных температур, указывает на скорость нагрева и охлаждения покрытия в ответ на изменения температуры окружающей среды, влияет на устойчивость материала к термическим деформациям и трещинообразованию. Значение удельной теплоемкости асфальтобетона, как и в случае коэффициента теплопроводности, зависит от его состава, включая содержание вяжущего, добавок и других компонентов, что может изменять термические свойства композита в целом.

Методика проведения исследований

Определение коэффициента теплопроводности выполнялось методом стационарного теплового потока. Для этого изготовлен образец в виде плиты размером 300×300 мм и толщиной 80 мм. Внешний вид образца представлен на рис. 1. Датчики плотности теплового потока размещены на «теплой» стороне образца в ключевых зонах: q_1 , q_3 , q_6 – на гладкой поверхности сплошной части; q_2 – в клеевом стыке фрагментов образца. Датчики температур t_2 и t_3 установлены на средней части «теплой» и «холодной» поверхностей образца соответственно. Температура внутреннего воздуха в помещении контролировалась датчиком t_1 , а температура холодного воздуха в морозильной камере – датчиком t_4 . Схема расположения датчиков, а также схема и внешний вид экспериментальной установки представлены на рис. 2.

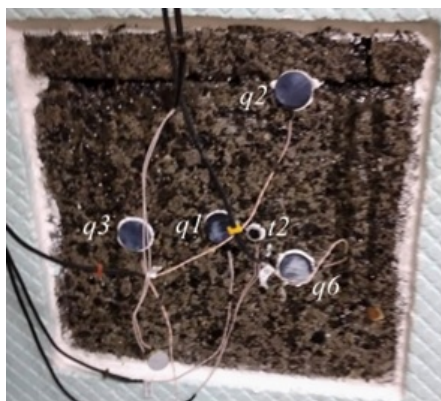


Рис. 1. Вид со стороны, противоположной морозильной камере

Fig. 1. View from the side opposite the freezer

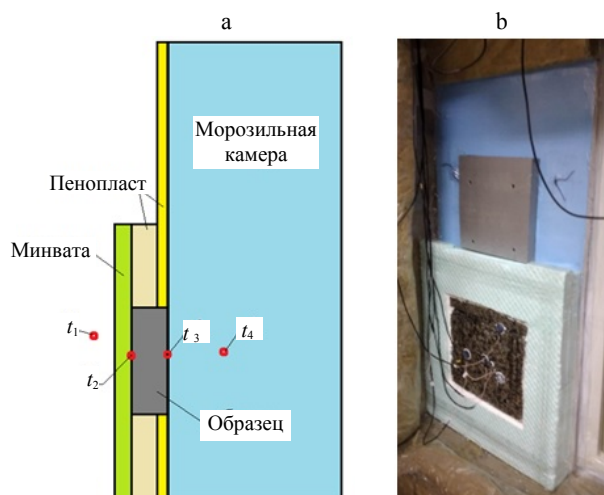


Рис. 2. Фрагмент экспериментальной установки (для наглядности минераловатная плита не установлена): а – схема установки; б – внешний вид

Fig. 2. Fragment of the experimental setup (the mineral wool board is not installed for clarity): а – installation diagram; б – appearance

Исследуемый образец был вклеен в плиты из пенопласта и закреплен в проеме морозильной камеры. С внутренней («теплой») стороны к исследуемому образцу и плите пенопласта прикреплена сплошная минераловатная плита. После включения морозильной камеры и достижения стационарного теплового режима производился сбор данных с датчиков плотности теплового потока и температур.

Для оценки удельной теплоемкости изготовлены два образца круглого сечения диаметром 100 мм и толщиной 50 мм. Внешний вид образцов представлен на рис. 3. Плотность образца 1 составила $\rho_1 = 2395 \text{ кг/м}^3$, а плотность образца 2 равнялась $\rho_2 = 2438 \text{ кг/м}^3$.

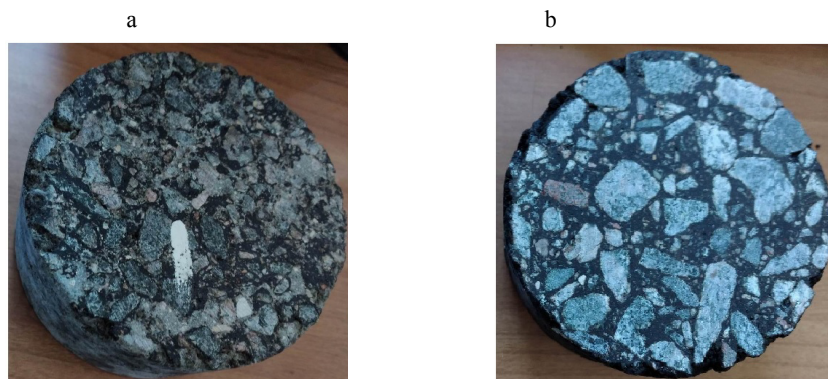


Рис. 3. Образцы для определения удельной теплоемкости: а – образец 1; б – образец 2

Fig. 3. Samples for determining specific heat capacity: а – sample 1; б – sample 2

Определение удельной теплоемкости образцов осуществлялось путем измерения количества теплоты, выделяемой каждым образцом при охлаждении в морозильной камере. Для этого образцы были вклеены в плиту из пенопласта, при этом с каждой стороны каждого образца размещались три датчика плотности теплового потока и один датчик температуры поверхности (рис. 4, 5). Поскольку тепловой

поток через боковые поверхности образцов можно считать незначительным, это объясняется тем, что используемая плита из пенопласта имеет массу, в 66 раз меньшую, и коэффициент теплопроводности, как минимум, в 12,5 раза меньший, чем у образцов. Затем вся установка помещалась в морозильную камеру. Многоканальный контроллер фиксировал средние значения параметров с интервалом в одну минуту.

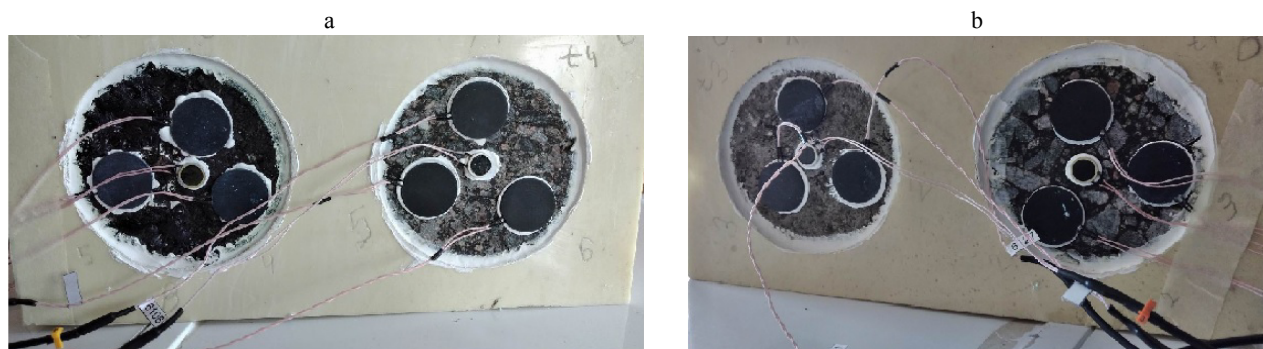


Рис. 4. Внешний вид исследуемых образцов, вклеенных в плиту пенопласта с размещенными на их поверхностях датчиками: а – сторона 1; б – сторона 2

Fig. 4. External view of the investigated samples embedded in a foam board, with sensors placed on their surfaces: а – side 1; б – side 2

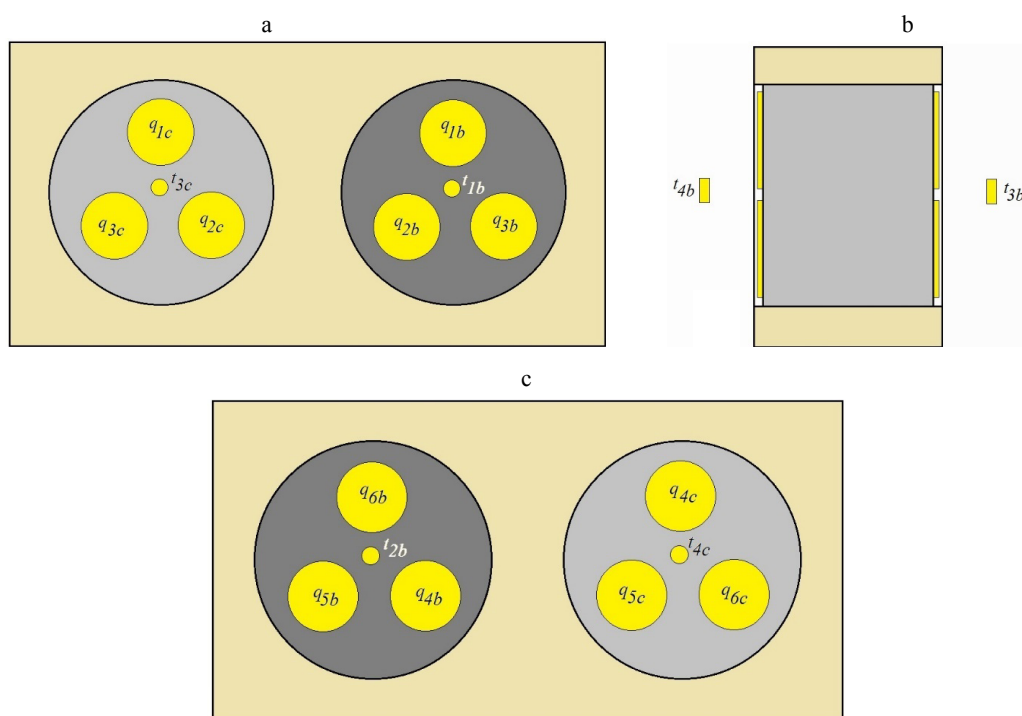


Рис. 5. Принципиальная схема расположения исследуемых образцов, вклеенных в плиту пенопласта, с размещенными на их поверхностях датчиками и датчиками температур внутреннего воздуха в морозильной камере: а – сторона 1; б – поперечный разрез; с – сторона 2

Fig. 5. Schematic diagram of the placement of the investigated samples embedded in a foam board, with sensors on their surfaces and temperature sensors for the internal air in the freezer: а – side 1; б – cross section; с – side 2

Датчики плотности тепловых потоков фиксировали количество теплоты, передаваемой образцами через их наружные поверхности в объем морозильной камеры. Для последующих расчетов были использованы следующие значения площадей поверхности образцов для каждого датчика плотности теплового потока:

– диаметр образцов составляет 100 мм, соответственно площадь одной из наружных поверхностей каждого образца $f = 0,00785 \text{ м}^2$;

– площадь наружной поверхности, приходящаяся на один датчик плотности теплового потока (условно), составляет $f_1 = f/3 = 0,00262 \text{ м}^2$.

Измерения проводились до достижения стабилизации температур на поверхностях каждого из образцов с обеих сторон.

Для определения коэффициентов теплового линейного расширения были изготовлены три образца: образец 1 (рис. 6а), прямоугольный параллелепипед квадратного сечения $50,7 \text{ мм} \times 50,3 \text{ мм}$ длиной $407,76 \text{ мм}$ при

температуре $25,4 \text{ }^\circ\text{C}$, масса 2615 г , плотность 2513 кг/м^3 ; образец 2 (рис. 6б), прямоугольный параллелепипед квадратного сечения $50,8 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм}$ длиной $408,66 \text{ мм}$ при температуре $25,4 \text{ }^\circ\text{C}$, масса 2460 г , 2330 кг/м^3 ; образец 3 (рис. 6с), прямоугольный параллелепипед квадратного сечения $48,5 \text{ мм} \times 49,0 \text{ мм}$ длиной $400,01 \text{ мм}$ при температуре $25,4 \text{ }^\circ\text{C}$, масса 2215 г , 2330 кг/м^3 .

Коэффициент теплового линейного расширения – это относительное изменение линейных размеров тела, происходящее в результате изменения его температуры на 1 К ($1 \text{ }^\circ\text{C}$) при постоянном давлении:

$$\alpha_L \approx \frac{\Delta l}{l \Delta T}, \text{ К}^{-1} \text{ или } (^\circ\text{C}^{-1}), \quad (1)$$

где Δl – изменение линейных размеров тела, м; l – начальный линейный размер, м; ΔT – изменение температуры тела, К ($^\circ\text{C}$).

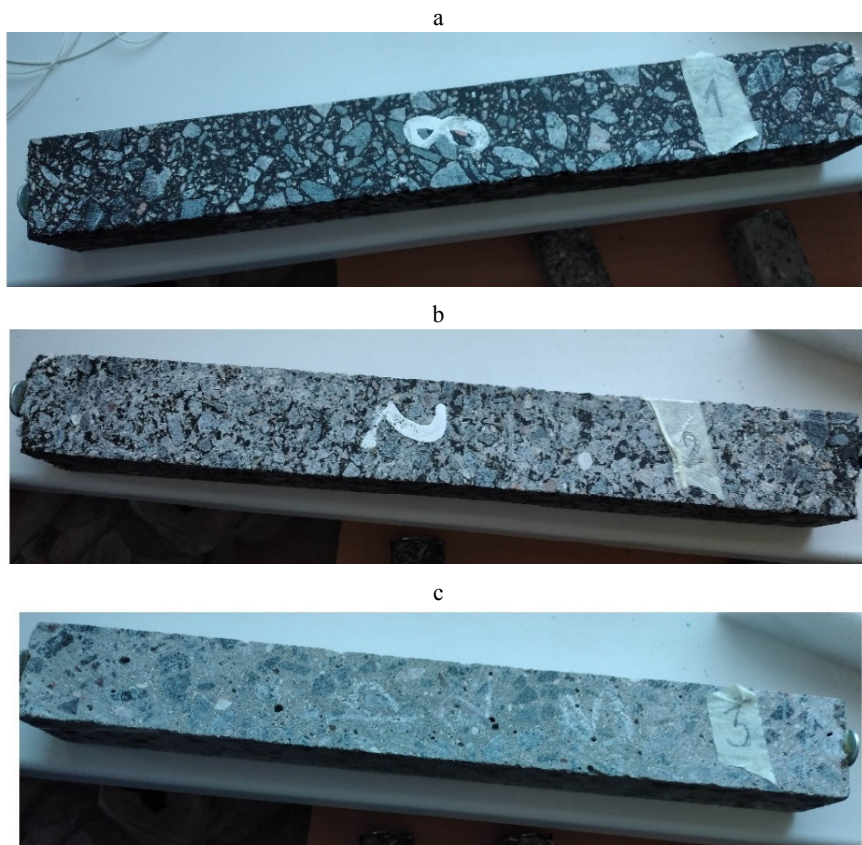


Рис. 6. Образцы для определения коэффициента теплового линейного расширения:

а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3

Fig. 6. Samples for determining the coefficient of linear thermal expansion:

а – sample 1; б – sample 2; с – sample 3

Для контроля изменения линейного размера (длины) на торцах образцов приклеены реперы. Линейные размеры контролировались с помощью микрометра. Выдержка образцов перед каждой серией испытаний составляла не менее трех суток после завершения предыдущей.

Первая серия измерений выполнялась при изменении температуры образцов от 24,6 до 54 °С в сушильном шкафу. Вторая серия измерений выполнялась при изменении температуры образцов от 26,5 до –20,0 °С в морозильной камере. Третья серия измерений выполнялась при изменении температуры образцов от 18,0 °С (комнатная) до –20,0 °С в морозильной камере.

Результаты испытаний

Результаты испытаний по определению коэффициента температурного расширения (сжатия) представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Результаты измерений при нагревании образцов от температуры 24,6 до 54,0 °С

Results of measurements during the heating of samples from temperature of 24.6 to 54.0 °C

	l_1 , м	l_2 , м	Δl , м	ΔT , °С	α_L , °С ⁻¹
Образец 1	0,40776	0,41371	0,00595	29,4	0,0004963
Образец 2	0,40866	0,41008	0,00142	29,4	0,0001182
Образец 3	0,40001	0,40008	0,00007	29,4	0,0000060

Таблица 2

Результаты измерений при первом охлаждении образцов от температуры 26,5 до –20,0 °С

Results of measurements during the first cooling of samples from temperature of 26.5 to –20.0 °C

	l_1 , м	l_2 , м	Δl , м	ΔT , °С	α_L , °С ⁻¹
Образец 1	0,412	0,409	–0,003	46,5	0,0001566
Образец 2	0,4096	0,4072	–0,0024	46,5	0,0001260
Образец 3	0,3995	0,3983	–0,0012	46,5	0,0000646

Таблица 3

Результаты измерений при втором охлаждении образцов от температуры 18,0 до –20,0 °С

R Results of measurements during the second cooling of samples from temperature of 18.0 to –20.0 °C

	l_1 , м	l_2 , м	Δl , м	ΔT , °С	α_L , °С ⁻¹
Образец 1	0,41114	0,41024	–0,0009	38,0	0,0000576
Образец 2	0,40873	0,40868	–0,00005	38,0	0,0000032
Образец 3	0,39965	0,39963	–0,00002	38,0	0,0000013

В результате стендовых исследований получены следующие результаты:

образец 1 (рис. 6а):

– при нагревании образца от температуры 24,6 до 54,0 °С коэффициент теплового линейного расширения составил $\alpha_L = 0,0005$ °С⁻¹;

– при первом охлаждении образца от 26,5 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,00016$ °С⁻¹;

– при втором охлаждении образца от 18,0 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,00006$ °С⁻¹;

образец 2 (рис. 6б):

– при нагревании образца от температуры 24,6 до 54,0 °С коэффициент теплового линейного расширения составил $\alpha_L = 0,00012$ °С⁻¹;

– при первом охлаждении образца от 26,5 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,00013$ °С⁻¹;

– при втором охлаждении образца от 18,0 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,000003$ °С⁻¹;

образец 3 (рис. 6с):

– при нагревании образца от температуры 24,6 до 54,0 °С коэффициент теплового линейного расширения составил $\alpha_L = 0,000006$ °С⁻¹;

– при первом охлаждении образца от 26,5 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,000065$ °С⁻¹;

– при втором охлаждении образца от 18,0 до –20,0 °С $\alpha_L = 0,0000013$ °С⁻¹.

Значения линейного расширения асфальтобетона, приводимые в научной литературе, преимущественно находятся в диапазоне 0,00001–0,00007 °С⁻¹. При нагреве и первичном охлаждении полученные значения коэффициентов теплового линейного расширения как для образца 1, так и для образца 2 имели одинаковый порядок.

Термическое сопротивление однородной ограждающей конструкции, а также слоя многослойной конструкции R , м²·°С/Вт, определяется по формулам:

– расчетным путем

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}, \quad (7)$$

где δ – толщина слоя, м; λ – коэффициент теплопроводности материала однослойной или слоя многослойной ограждающей конструкции, Вт/(м·°С);

– по результатам стендовых измерений

$$R = \frac{t_b - t_n}{q}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (8)$$

где t_b – температура поверхности образца со стороны помещения t_2 , °C; t_n – то же со стороны морозильной камеры t_3 , °C; q – средняя плотность теплового потока для рассматриваемого участка, Вт/м².

Из равенства результатов обеих формул следует

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{t_b - t_n}{q}. \quad (9)$$

Из этого равенства и получаем формулу для расчета коэффициента теплопроводности по результатам измерений методом стационарного теплового потока

$$\lambda = \frac{\delta q}{t_b - t_n}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \quad (10)$$

При установившемся стационарном тепловом режиме получены следующие результаты:

$$q_1 = 30,7 \text{ Вт/м}^2; q_2 = 37,5 \text{ Вт/м}^2; q_3 = 30,8 \text{ Вт/м}^2; q_6 = 32,6 \text{ Вт/м}^2;$$

$$t_1 = 23,6 \text{ °C}; t_2 = -15,3 \text{ °C}; t_3 = -20,2 \text{ °C}; t_4 = -28,1 \text{ °C}.$$

В соответствии с результатами экспериментальных исследований получены значения коэффициентов теплопроводности для участков исследуемого образца:

– по глади сплошной части образца – участок 1: $\lambda_1 = 0,501 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; участок 3: $\lambda_3 = 0,503 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; участок 6: $\lambda_6 = 0,532 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
– клеевой стык фрагментов образца: участок 2: $\lambda_2 = 0,612 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Количество теплоты на нагревание или охлаждение тела Q , Вт, определяется по формуле

$$Q = 0,28cm\Delta t, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где m – масса тела, кг; c – удельная теплоемкость тела, кДж/(кг·°C); Δt – разность начальной и конечной температур тела после его нагревания или охлаждения, °C.

Соответственно удельная теплоемкость будет определяться по формуле

$$c = \frac{Q}{0,28m\Delta t}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}. \quad (12)$$

Начальная температура образца 1 составляла $t_n = 23,4 \text{ °C}$. Стабилизация температуры поверхностей образца 1 в процессе его охлаждения произошла при значениях $t_{3,4} = -25,9 \text{ °C}$ через 6 ч (361 мин). Значения плотностей тепловых потоков на поверхности образца 1 после стабилизации температуры наружных поверхностей, т. е. в конечной точке измерений, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения плотностей тепловых потоков на поверхности образца 1 после стабилизации температуры наружных поверхностей
Values of heat flux densities on the surface of sample 1 after stabilization of the external surface temperatures

q_1 , Вт/м ²	q_2 , Вт/м ²	q_3 , Вт/м ²	q_4 , Вт/м ²	q_5 , Вт/м ²	q_6 , Вт/м ²
5,3	7,5	5,7	8,9	9,2	6,1

По формуле $\frac{\delta}{\lambda} = \frac{t_b - t_n}{q}$, приняв из преды-

дущего эксперимента коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,503 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, получаем значение температуры в средней части образца $t_{3,4\text{центр}} = -25,6 \text{ °C}$. Таким образом, средняя температура образца в конечной точке измерений составляет $t_{cp} = -25,75 \text{ °C}$.

Разность начальной и конечной температур образца 1 после его охлаждения составила

$$t_b - t_n = 23,4 - (-25,75) = 49,15 \text{ °C}.$$

Количество теплоты на охлаждение образца Q , Вт, в процессе эксперимента определяется по формуле

$$Q = \sum (q_i \cdot f_i / 60), \text{ Вт}, \quad (13)$$

где $f_i = f_1 = f_3 = 0,00262 \text{ м}^2$; q_i – плотность теплового потока, фиксируемая каждым датчиком за период измерений, т. е. 361 – значение плотности теплового потока для каждого датчика, Вт/м².

За весь период измерений количество теплоты на охлаждение образца составило: $Q = 7,83311$ Вт.

Соответственно удельная теплоемкость образца 1 составила

$$c = \frac{7,83311}{0,28 \cdot 0,94 \cdot 49,15} = 0,606, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Как видно, полученное значение отличается от справочных значений. Таким образом, можно сделать вывод, что для получения более точных данных необходимо продолжить исследования по предлагаемой программе.

В связи с тем, что компоненты асфальтобетона с изменением температуры и крупности изменяют свои реологические характеристики, необходимо определить коэффициенты линейного расширения в следующих интервалах температур:

20,0–60,0 °C – пределы летнего нагрева дорожного покрытия, когда битум максимально пластичный;

0–20,0 °C – интервал, когда битум теряет вязкость;

(–18,0)–0 °C – интервал, когда битум сохраняет пластичность;

(–28,0)–(–18,0) °C – интервал от минимальной температуры охлаждения покрытия дороги до температуры стеклования битума.

В каждом из указанных интервалов структура материалов будет деформироваться по-своему. Зная коэффициенты расширения в каждом интервале и температуру устройства покрытия, можно будет рассчитать сезонные деформации и напряжения в покрытии. Если напряжения будут превосходить предел прочности материала на растяжение, необходимо устраивать деформационные швы. Можно будет рассчитать расстояние между швами.

Теплоемкость и теплопроводность нужны для определения внутренних напряжений в структуре материала при перепадах температур. Нужно определить градиенты перепадов температур при радиационном нагреве или резком охлаждении воздуха и показатели температурного расширения–сжатия компонентов асфальтобетонов по глубине слоя.

ВЫВОДЫ

1. Аналитические и локальные экспериментальные исследования проведены в рамках совместного проекта белорусских и китайских ученых и специалистов под названием «Студия выдающихся зарубежных ученых по экологически чистым низкоуглеродным технологиям строительства и содержания дорожных покрытий» (грант № GZS2022004). Результаты показали, что асфальтобетон имеет сложную структуру, характеризующуюся изменчивыми физико-техническими и теплофизическими свойствами каждого элемента.

2. Результаты данных исследований являются составляющей частью цикла исследований, выполненных совместно белорусскими и китайскими исследователями [14–19], и рекомендуются как методика для определения физико-технических и теплофизических характеристик асфальтобетона.

3. Физико-технические и теплофизические характеристики отдельных компонентов зависят от их взаимодействия с другими, что в конечном итоге влияет на общие деформационные свойства материала.

4. Для разработки алгоритма подбора состава асфальтобетона из его составляющих необходимо продолжить исследования в данном направлении согласно предложенной программе.

5. Технология приготовления компонентов асфальтобетонных смесей позволяет использовать широкий спектр вторичных материалов (после регенерации) с восстановлением до 90 % первоначальной прочности, варьируя которые можно в широком диапазоне изменять физико-технические и теплофизические характеристики конструктивного слоя асфальтобетона с целью оптимизации его эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
2. Ghafari, S. R-Curve Behavior and Crack Propagation Properties of Asphalt Concrete at Low Temperatures / S. Ghafari, F. M. Nejad // Journal of Civil Engineering

- and Management. 2015. Vol. 21, No 5. P. 559–570. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.890653>.
3. A Full-Scale Field Experiment to Study the Hydrothermal Behavior of the Multilayer Asphalt Concrete Pavement in Cold Regions / Di Wu [et. al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 267. Art. 121855. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121855>.
 4. Rith, M. Reflective Cracking from Thermal Loading in Asphalt–Concrete Composite Pavements / M. Rith, Y. K. Kim, S. W. Lee // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport*. 2019. Vol. 175, No 3. P. 178–186. <https://doi.org/10.1680/jtran.18.00189>.
 5. Investigation on Statistical Characteristics of Asphalt Concrete Dynamic Moduli with Random Aggregate Distribution Model / P. Cao [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 148. P. 723–733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.012>.
 6. Pirmohammad, S. Asphalt Concrete Resistance Against Fracture at Low Temperatures under Different Modes of Loading / S. Pirmohammad, M. R. Ayatollahi // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 110. P. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.001>.
 7. Prediction of Concrete Coefficient of Thermal Expansion and other Properties using Machine Learning / V. Nilssen [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 220. P. 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.006>.
 8. Three-Dimensional Microstructure Based Model for Evaluating the Coefficient of Thermal Expansion and Contraction of Asphalt Concrete / J. Chen [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122764>.
 9. Cheng, J. Temperature-Dependent Viscoelastic Model for Asphalt Concrete using Discrete Rheological Representation / J. Cheng, X. Qian // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. P. 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.106>.
 10. Nonlinear Viscoelastic Analysis of Unaged and Aged Asphalt Binders / E. Masad [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, No 11. P. 2170–2179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.012>.
 11. On the Thermal Characterization of Solids by Photoacoustic Calorimetry: Thermal Diffusivity and Linear Thermal Expansion Coefficient / A. Bedoya [et al.] // *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 614. P. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.06.009>.
 12. Hou, T.-C. A new Approach for Determination of the Coefficient of Thermal Expansion of Asphalt Concrete / T.-C. Hou, S.-J. Huang, C. Hsu // *Measurement*. 2016. Vol. 85. P. 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.035>.
 13. Effect of Aggregate Gradation and Asphalt Mix Volumetrics on the Thermal Properties of Asphalt Concrete / M. A. Khasawneh [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Art. e01725. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01725>.
 14. Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete / Z. Qing [et al.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 490–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498>.
 15. Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering / B. M. Khroustalev [et al.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>.
 16. Specific Features of Heat and Mass Transfer Processes in Road Dressings / B. M. Khroustalev [et al.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 517–526. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-517-526>.
 17. Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements / B. M. Khroustalev [et al.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
 18. Recycling of Materials for Pavement Dressing: Analytical Review / T. Liu [et al.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 104–112. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112>.
 19. Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders / B. M. Khroustalev [et al.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>.

Поступила 20.08.2024

Подписана в печать 21.10.2024

Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Verenko V. A., Zankovich V. V., Ladyshev A. A., Lira S. V., Afanasenko A. A., Yatsevich P. P. (2015) *Durable Asphalt Concrete Pavements for Roads, Bridges and Streets*. Minsk, Art Design Publ. 296 (in Russian).
2. Ghafari S., Nejad Moghadas F. (2015) R-Curve Behavior and Crack Propagation Properties of Asphalt Concrete at Low Temperatures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21 (5), 559–570. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.890653>.
3. Wu D., Jin L., Leng Y., Hu M., Bi R., Tang L., Gao Z., Yang G. (2021) A Full-Scale Field Experiment to Study the Hydrothermal Behavior of the Multilayer Asphalt Concrete Pavement in Cold Regions. *Construction and Building Materials*, 267, 121855. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121855>.
4. Rith M., Kim Y. K., Lee S. W. (2022) Reflective Cracking from Thermal Loading in Asphalt–Concrete Composite Pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 175 (3), 178–186. <https://doi.org/10.1680/jtran.18.00189>.
5. Cao P., Jin F., Changjun Z., Feng D. (2017) Investigation on Statistical Characteristics of Asphalt Concrete Dynamic Moduli with Random Aggregate Distribution Model. *Construction and Building Materials*, 148, 723–733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.012>.
6. Pirmohammad S., Ayatollahi M. R. (2015). Asphalt concrete Resistance Against Fracture at Low Temperatures under Different Modes of Loading. *Cold Regions Science*

- and Technology, 110, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.001>.
7. Nilsen V., Pham L. T., Hibbard M., Klager A., Cramer S. M., Morgan D. (2019) Prediction of Concrete Coefficient of Thermal Expansion and Other Properties using Machine Learning. *Construction and Building Materials*, 220, 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.006>.
 8. Chen J., Zhang L., Du Y., Wang H., Dan H. (2021) Three-Dimensional Microstructure Based Model for Evaluating the Coefficient of Thermal Expansion and Contraction of Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials*, 284, 122764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122764>.
 9. Cheng J., Qian X. (2015) Temperature-Dependent Viscoelastic Model for Asphalt Concrete using Discrete Rheological Representation. *Construction and Building Materials*, 93, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.106>.
 10. Masad E., Huang C.-W., Airey G., Muliana A. (2008) Nonlinear Viscoelastic Analysis of Unaged and Aged Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, 22 (11), 2170–2179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.012>.
 11. Bedoya A., Marín E., Mansanares A. M., Zambrano-Arjona M. A., Riech I., Calderón A. (2015). On the Thermal Characterization of Solids by Photoacoustic Calorimetry: Thermal Diffusivity and Linear Thermal Expansion Coefficient. *Thermochimica Acta*, 614, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.06.009>.
 12. Hou T.-C., Huang S.-J., Hsu C. (2016). A New Approach for Determination of the Coefficient of Thermal Expansion of Asphalt Concrete. *Measurement*, 85, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.035>.
 13. Khasawneh M. A., Sawalha A. A., Aljarrah M. T., Alsheyab M. A. (2023) Effect of Aggregate Gradation and Asphalt Mix Volumetrics on the Thermal Properties of Asphalt Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01725. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01725>.
 14. Zhang Q., Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G., Hou Q. (2022) Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (6), 490–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498>.
 15. Khroustalev B. M., Liu T., Aliakseyeu Yu. G., Li Z., Akeliev V. D., Minchenya V. T. (2022) Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>.
 16. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Aliakseyeu Yu. G., Shi J., Zankovich V. V. (2018) Specific Features of Heat and Mass Transfer Processes in Road Dressings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 517–526. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-517-526>.
 17. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Li Z., Aliakseyeu H. Yu., Zankovich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
 18. Liu T., Zankovich V. N., Aliakseyeu Yu. G., Khroustalev B. M. (2019) Recycling of Materials for Pavement Dressing: Analytical Review. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 18 (2), 104–112. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112>.
 19. Khroustalev B. M., Veranko U. A., Zankovich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yu., Shang B., Shi J. (2020) Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (3), 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>.

Received: 20.08.2024

Accepted: 21.10.2024

Published online: 29.11.2024