

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ



УДК 691.31 : 666.964.3 : 536.2

Н.И. ПАНЕВИН, С.В. ГОШОВЕЦ, Н.С. ГОШОВЕЦ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕРАБОТАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА И КОМПЛЕКСНОГО ВЯЖУЩЕГО

Работа посвящена исследованию холодных органоминеральных смесей с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего из битумной эмульсии и цемента, применяемых для устройства основания дорожной одежды. Уточнен и апробирован метод определения коэффициента линейного температурного расширения образцов дорожно-строительных материалов. Проведены сравнительные испытания по определению коэффициента линейного температурного расширения для образцов из асфальтобетона, щебеночно-песчаной смеси, обработанной неорганическим вяжущим и органоминеральной смесью.

К л ю ч е в ы е с л о в а: холодная органоминеральная смесь, коэффициент линейного температурного расширения, критические напряжения, коагуляционные и кристаллизационные микроструктурные связи.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-742-10-89-100

Введение. Известно, что различия деформативных и теплофизических показателей покрытия и основания оказывают влияние на сроки службы асфальтобетонных покрытий. Чем больше различаются прочностные характеристики и линейное температурное расширение материалов покрытия и основания, тем хуже их совместная работа под действием нагрузок и особенно при понижении температуры, когда возникает опасность развития температурных трещин. Коэффициенты линейного температурного расширения асфальтобетонного покрытия и основания из цементобетона и минеральных материалов, укрепленных минеральными (неорганическими) вяжущими, разнятся на порядок, поэтому в такой конструкции трещины неизбежны.

В России в последние годы для устройства основания дорожной одежды широкое применение находят холодные органоминеральные смеси с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего из

битумной эмульсии и цемента, по ПНСТ 306–2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием переработанного асфальтобетона (РАП). Технические условия». Для холодной органоминеральной смеси с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего (ОМС-ЭМ) величина коэффициента линейного температурного расширения ранее не определялась. Поэтому определение и анализ коэффициента, применительно к ОМС-ЭМ, является актуальной задачей, решение которой позволит лучше понять и прогнозировать долговечность дорожной одежды, в основании которой содержится слой из ОМС-ЭМ.

Целью настоящей работы является уточнение и апробация метода определения коэффициента линейного температурного расширения образцов дорожно-строительных материалов, проведение сравнительных испытаний по определению коэффициента линейного температурного расширения для образцов из асфальтобетона, щебеночно-песчаной смеси, обработанной неорганическим вяжущим и ОМС-ЭМ.

1. Теоретическое исследование коэффициентов линейного температурного расширения связных материалов дорожной одежды и влияния температурного расширения на образование деформаций покрытия. При смене температуры дорожно-строительные материалы, включенные в совместную работу конструкции дорожной одежды, изменяют свои размеры. Благодаря сцеплению между материалами, в смежных слоях могут возникать критические напряжения, приводящие к деформациям покрытия. Эти напряжения можно оценить с помощью формулы [1]

$$\sigma = E_{a/b}(\alpha_{a/b} - \alpha_{осн})\Delta T, \quad (1)$$

где $E_{a/b}$ – модуль деформации (модуль Юнга) асфальтобетона;

ΔT – интервал изменения температуры;

$\alpha_{a/b}$ и $\alpha_{осн}$ – коэффициенты линейного теплового расширения асфальтобетона и основания соответственно.

Как видно из формулы (1), чем больше разница между коэффициентами α для материалов покрытия и основания, тем больше напряжение, возникающее при перепаде температуры.

Как показывают исследования [2–5], существенное влияние на свойства ОМС-ЭМ как материала оказывает совмещение коагуляционных и кристаллизационных микроструктурных связей. При формировании этих связей гидратация цемента приводит к недостатку воды в битумной эмульсии, что ускоряет ее распад [3]. Распад битумной эмульсии также ускоряет обволакивание битумом цемента и продуктов гидратации, что, в свою очередь, влияет на гидратацию цемента. Это явление показывает, что процессы образования продуктов гидратации и битумной пленки происходят одновременно, и оба они ограничивают и влияют друг на друга, так что продукты гидратации и битум переплетаются, образуя коагуляционно-кристаллизационную микроструктуру.

За счет такой структуры в одних случаях, как, например, показано в исследованиях [4, 6], материал из ОМС-ЭМ демонстрирует вязкоупругое поведение (хотя и в меньшей степени, чем у асфальтобетона), унаследованное

от асфальтостабилизирующего агента (эмульсионный остаток) и состаренного битума в переработанном асфальтобетоне. В других случаях, как в [7], ОМС-ЭМ проявляет поведение, аналогичное другим цементно-связанным материалам, таким как цементобетон.

Таким образом, опираясь на исследования [2–7], можно предположить, что смеси ОМС-ЭМ будут занимать промежуточное положение между асфальтобетоном и минеральными материалами, укрепленными неорганическими вяжущими, а коэффициент α может находиться в диапазоне от $1,3 \cdot 10^{-5}$ до $7,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

2. Материалы для испытаний. Для экспериментального определения коэффициента линейного температурного расширения α из смеси ОМС-ЭМ (ХО 32 ЭМ по ПНСТ 306–2018) были изготовлены образцы (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические свойства ХО 32 ЭМ

Показатель	Фактический показатель	Требования ПНСТ 306–2018
Объемная плотность, г/см ³	2,26	Не нормируется
Водонасыщение, %	7,7	3,0–10,0
Водостойкость не менее	0,9	0,5
Предел прочности на сжатие, МПа, при температуре, $^\circ\text{C}$, не менее		
20	2,4	1,5
50	1,3	1,0
Предел прочности при непрямом растяжении, МПа, не менее	0,27	0,25
Совместимость битумной эмульсии и минеральной части	Совместима	Совместима

Состав смеси ХО 32 ЭМ, % (эмульсия и вода сверх 100 %):

Щебень фракции 22,4–31,5 мм (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	19
Щебень фракции 8–16 мм (ООО «Мехтранссервис») по ГОСТ 32703–2014	19
Песок дробленый (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	15
Гранулят старого асфальтобетона по ГОСТ Р 55052–2012	44
Портландцемент ЦЕМ I-42,5Н (АО «Себряковцемент») по ГОСТ 33174–2014	3
Вода по ГОСТ 23732–2011	3
Эмульсия битумная дорожная ЭБДК М по ГОСТ Р 55420–2013	4
Итого:	107

Для проведения сравнительных испытаний из асфальтобетонной смеси А32НТ по ГОСТ Р 58406.2–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия», изготовлены образцы (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Физико-механические свойства А32НТ

Показатель	Фактический показатель	Требования ГОСТ Р 58406.2–2020
Средняя плотность, г/см ³	2,26	Не нормируется
Содержание воздушных пустот, %	5,2	От 3,5 до 6,0
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	18	Не менее 11,0
Пустоты, заполненные битумным вяжущим (ПНБ), %	71	65–75
Средняя глубина колеи, мм	4,3	Не более 5,5
Водостойкость не менее	0,89	0,85

Состав асфальтобетонной смеси А32НТ, % (битум сверх 100 %):

Щебень фракции 22,4–31,5 мм (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	24
Щебень фракции 11,2–16 мм (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	10
Щебень фракции 4–8 мм (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	19
Песок дробленый 0–4 мм (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 32703–2014	45
Порошок минеральный неактивированный МП-2 (ООО «ВЗМП») по ГОСТ 32761–2014	2
Битум БНД 50/70, в том числе 0,6 % адгезионная добавка «ДАД-1» от массы битума (АО «МНПЗ») по ГОСТ 33133–2014	4,2
Итого:	104,2

Кроме того, изготавливались образцы из щебеночно-песчаной смеси, обработанной неорганическим вяжущим, М40, по ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия» (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Физико-механические свойства щебеночно-песчаной смеси, обработанной 5 % цемента, М40 (ЩПЦС)

Показатель	Фактический показатель	Требования ГОСТ 23558–94
Средняя плотность, г/см ³	2,26	Не нормируется
Предел прочности на сжатие, МПа, не менее	5,1	4,0
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа, не менее	0,84	0,8

Состав щебеночно-песчаной смеси, обработанной цементом, М40, % (вода и цемент сверх 100 %):

Щебеночно-песчаная смесь С-6 (АО «Павловск Неруд») по ГОСТ 25607–2009	100
Вода по ГОСТ 23732–2011	3,85
Портландцемент ЦЕМ I-42,5Н (АО «Себряковцемент») по ГОСТ 33174–2014	5
Итого:	108,85

3. Методика проведения испытаний. Для определения коэффициента линейного температурного расширения α использовалась известная связь линейного α и объемного β коэффициентов расширения изотропных тел по формуле

$$\beta = 3\alpha. \quad (2)$$

Первоначально программой эксперимента планировалось определять значение коэффициента объемного температурного расширения образцов β по методике [8–9], суть которой заключается в том, что испытуемый образец из дорожно-строительных материалов насыщается полиметилсилоксановой жидкостью (ПМС-5) и помещается в измерительную камеру дилатометра, которая заполняется ПМС-5 и герметизируется. Загерметизированная измерительная камера дилатометра устанавливается в морозильную камеру, в которой ее замораживают с установленной скоростью до установленной температуры, при этом измеряют изменение объема рабочей жидкости в камере дилатометра датчиком уровня. По изменению этого объема оценивают величину линейной температурной деформации испытуемого образца.

Однако после тестовых испытаний образцов из смеси А32НТ выяснилось, что они увеличивались в объеме в среднем на 0,32 %. Также образцы демонстрировали увеличение массы на 5–6 г, что указывало на миграцию рабочей жидкости из измерительной камеры прибора в поры образца. Эти процессы существенно искажали результаты эксперимента, поэтому возникла необходимость совершенствования методики, приведенной в [9].

Вместо предварительного насыщения образцов рабочей жидкостью, как указано в [9], было проведено разделение жидкой (ПМС-5) и твердой (образец дорожно-строительного материала) сред в измерительной камере дилатометра путем предварительной обработки образцов латексом [10, 11] с последующей выдержкой в сушильном шкафу при температуре 60 °С. Образовавшаяся каучуковая пленка плотно прилегает к образцу, надежно защищает его от миграции рабочей жидкости в поры, обладает устойчивостью к ПМС-5 и эластичностью в диапазоне температур, при которых проводились исследования. Обработка образцов латексом вместо предварительного насыщения рабочей жидкостью позволила исключить системную ошибку, возникающую при определении температурного объемного коэффициента β по методу, предложенному в [9].

Подготовка образцов. Для испытаний отобрано по 3 образца из А32НТ, ХО 32 ЭМ и ЩПЦС. Образцы из А32НТ изготавливали по ГОСТ Р 58406.9–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод приготовления образцов уплотнителем Маршалла» в лаборатории. Образцы из смесей ХО 32 ЭМ получали по ПНСТ 306–2018 и выдерживали в условиях, обеспечивающих нормальное твердение (температура воздуха – (22 ± 3) °С, влажность – не менее 95 %) в течение 14 сут. Цилиндрические образцы из ЩПЦС изготавливали в соответствии с ОДМ «Методические рекомендации по получению оптимальных составов щебеночно-песчано-цементных смесей» и затем выдерживали в условиях,

обеспечивающих нормальное твердение (температура воздуха – $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$, влажность – не менее 95 %) в течение 28 сут. Перед испытанием образцы высушивали до постоянной массы и взвешивали на воздухе, затем в воде по методу, изложенному в ГОСТ Р 58401.10–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности» (п. 9.1).

После взвешивания в воде образцы снова высушивали до постоянной массы и при температуре $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ двукратно обрабатывали катионным латексом СБС-65КБ (образцы из смесей А32НТ и ХО 32 ЭМ) и анионным латексом СБС-65АБ (образцы из ЩПЦС). После полного высыхания латекса и формирования каучуковой пленки образцы снова взвешивали на воздухе и в воде. Двойному контролю подвергалась водонепроницаемость сформированной каучуковой пленки. До начала испытаний проводили визуальный осмотр сплошности латексного покрытия и взвешивание образца на воздухе после его выдерживания в воде в течение 30 мин. После испытания проводили контрольное взвешивание образца на воздухе, которое не зафиксировало увеличение массы. Результаты эксперимента считались приемлемыми при отсутствии увеличения массы и объема образца.

Определение физических характеристик бутадиен-стирольного каучука. Плотность устанавливали гидростатическим методом. Взвешенный на воздухе образец каучука массой G накалывали на проволоку, подвешивали к плечу весов и опускали в стакан с этиловым спиртом. Плотность вычисляли по формуле [2]

$$\rho = G\rho_0 / (G - G_1), \quad (3)$$

где G – масса образца на воздухе, г;

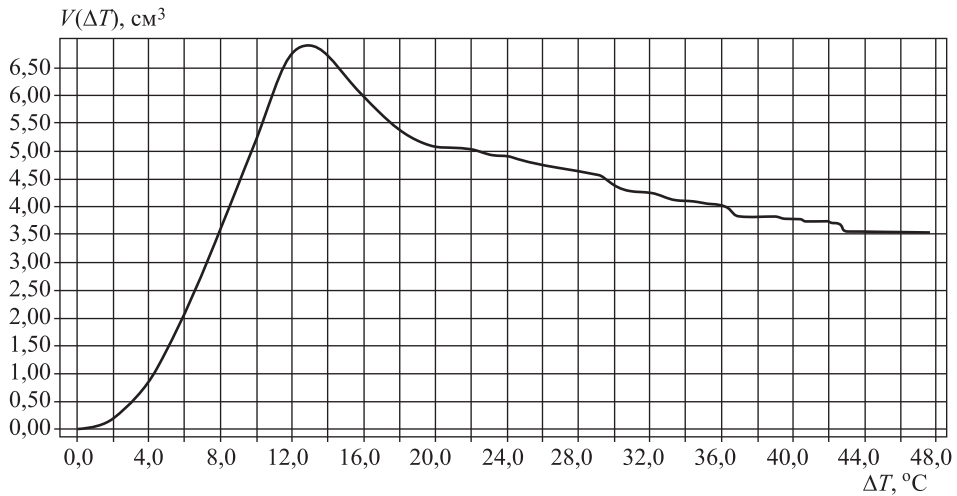
G_1 – масса образца в спирте, г;

ρ_0 – плотность спирта при 20°C , г/см^3 .

Определенная по формуле (3) плотность изготовленного из латекса образца бутадиен-стирольного каучука составила $0,94 \text{ г/см}^3$. Коэффициент объемного расширения β принят $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Подготовка рабочей жидкости. На стадии подготовки к эксперименту пикнометрическим методом по ГОСТ 18995.1–73 (СТ СЭВ 1504–79) «Продукты химические жидкие. Методы определения плотности» была установлена плотность рабочей жидкости, которая составила $0,91 \text{ г/см}^3$. Затем при помощи комплекса «БЕТОН-ФРОСТ» определено изменение объема рабочей жидкости при охлаждении на ΔT в морозильной камере. Результат эксперимента с рабочей жидкостью приведен на рисунке.

Как видно из рисунка, в силу существенного различия коэффициентов температурного расширения β и скорости изменения объема между рабочей жидкостью и алюминиевой измерительной камерой ($\beta_{\text{ал}} = 6,84 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [13]), в процессе охлаждения сначала резко возрастает ΔV за счет более высокого темпа температурного сжатия рабочей жидкости, затем происходит стабилизация ΔV (уменьшение) из-за температурного сжатия измерительной камеры. После достижения установленной в морозильной камере температуры охлаждения система приходит в равновесие.



График, регистрирующий изменение объема рабочей жидкости ΔV при охлаждении рабочей камеры в морозильной камере до заданной температуры

Коэффициент β для рабочей жидкости рассчитывали по формуле

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{ж1}} + \Delta V - V_{\text{к2}}}{V_{\text{ж1}} \Delta T}, \quad (4)$$

где $V_{\text{ж1}}$ – объем жидкости, залитой в измерительную камеру дилатометра, определяется отношением массы залитой жидкости $m_{\text{ж}}$ к ее плотности $\rho_{\text{ж}}$; $V_{\text{к2}}$ – объем измерительной камеры после охлаждения.

$$V_{\text{к2}} = V_{\text{к1}} (1 - \beta_{\text{к}} \Delta T), \quad (5)$$

где $\beta_{\text{к}} = \beta_{\text{ал}}$; $V_{\text{к1}} = V_{\text{ж1}}$.

Данные, необходимые для расчета коэффициента β для рабочей жидкости в диапазоне температур от 25 до -20 °C:

$m_{\text{ж}}$	1090,18 г
$\rho_{\text{ж}}$	0,91 г/см ³
ΔV	3,51 см ³
ΔT	47,0 °C
$V_{\text{ж1}}$	1198,00 см ³
$V_{\text{к1}}$	1198,00 см ³
$\beta_{\text{к}}$	0,000131 °C ⁻¹

Используя формулы (4) и (5) определен коэффициент температурного расширения β для рабочей жидкости, который составил $13,1 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹.

По результатам испытаний производился расчет коэффициента линейного температурного расширения испытуемого образца связного материала конструкции дорожной одежды

$$\alpha_{\text{обр}} = \frac{V_{\text{ж2}} + V_{\text{лат2}} + V_{\text{обр1}} + \Delta V - V_{\text{к2}}}{3V_{\text{обр1}} \Delta T}, \quad (6)$$

где $V_{\text{ж2}}$, $V_{\text{лат2}}$, $V_{\text{к2}}$ – объем рабочей жидкости, латексного покрытия образца, измерительной камеры соответственно после охлаждения до температуры T , см³; $V_{\text{обр1}}$ – объем испытуемого образца до обработки латексом.

$$V_{ж2} = V_{ж1}(1 - \beta_{ж} \Delta T), \quad (7)$$

где $\beta_{ж}$ – коэффициент объемного температурного расширения рабочей жидкости, определенный по формуле (4), $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$V_{ж1}$ – объем рабочей жидкости, залитой в испытательную камеру, см^3 .

$$V_{лат2} = V_{лат1}(1 - \beta_{лат} \Delta T), \quad (8)$$

где $\beta_{лат}$ – коэффициент объемного температурного расширения латексного покрытия (группа синтетических каучуков), принят по табличному значению, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$V_{лат1}$ – объем латексного покрытия, определенный до начала испытания, см^3 .

4. Результаты эксперимента по определению коэффициента температурного расширения. Среднее значение $\alpha_{обр}$ для испытанных образцов ЩПЦС, полученное в результате эксперимента, составляет $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Эти результаты близки к значениям, приведенным в [14] для цементогрунта ($\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Среднее значение $\alpha_{обр}$ для образцов А32НТ составляет $3,42 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Эти результаты согласуются с исследованиями [1, 15].

После того, как были найдены коэффициенты температурного расширения для образцов из ЩПЦС и смеси А32НТ, определялось изменение объема рабочей жидкости при охлаждении образцов из холодной органоминеральной смеси ХО 32 ЭМ по ПНСТ 306–2018.

Среднее значение $\alpha_{обр}$ для испытанных образцов ХО 32 ЭМ, полученное в результате эксперимента, составляет $3,75 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

5. Обсуждение результатов эксперимента. Коэффициент температурного расширения α испытываемых образцов из смеси ХО 32 ЭМ больше коэффициента образцов из смеси ЩПЦС ($1,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) и коэффициента образцов из смеси А32НТ ($3,42 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). С учетом формулы (1) критические напряжения между слоями из смесей А32НТ и ЩПЦС, приводящие к температурным деформациям, будут в 6 раз больше, чем между слоями из смесей А32НТ и ХО 32 ЭМ. Это свидетельствует о преимуществе применения в основании дорожной одежды материалов из холодных органоминеральных смесей с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего из битумной эмульсии и цемента по сравнению с материалами из ЩПЦС, с точки зрения температурной трещиностойкости.

Превышение значения коэффициента α для образцов из смеси ХО 32 ЭМ по сравнению с образцами из смеси А32НТ можно объяснить более высоким содержанием битумного вяжущего в образцах из смеси ХО 32 ЭМ. Содержание битумного вяжущего в испытуемом образце из ХО 32 ЭМ, включая битум из эмульсии и состаренный битум из гранулята старого асфальтобетона, составляет 4,5 %. Содержание битумного вяжущего в испытуемом образце из А32НТ – 4,2 %. Результаты эксперимента показывают, что тенденция повышения коэффициента α при увеличении в связных дорожно-строительных материалах содержания битума наблюдается не только в отношении асфальтобетонов, как отмечено в работе [1], но и для органоминеральных смесей с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего.

Выводы. 1. Усовершенствована и апробирована методика определения коэффициента температурного расширения для связных дорожно-строительных материалов с использованием объемного dilatометра (комплекс «БЕТОН-ФРОСТ»). Данная методика может быть рекомендована для определения коэффициента температурного расширения при подборе составов смесей в испытательных лабораториях.

2. Определен коэффициент линейного температурного расширения материала из ХО 32 ЭМ, проведены сравнительные испытания по определению коэффициента линейного температурного расширения для образцов из смеси А32НТ, щебеночно-песчаной смеси, обработанной неорганическим вяжущим.

3. Критические напряжения между слоями из смесей А32НТ и ЩПЦС, приводящие к температурным деформациям, в 6 раз больше, чем между слоями из смесей А32НТ и ХО 32 ЭМ. Это свидетельствует о преимуществе применения в основании дорожной одежды материалов из холодных органоминеральных смесей с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего из битумной эмульсии и цемента по сравнению с материалами из ЩПЦС, с точки зрения температурной трещиностойкости.

4. Тенденция повышения коэффициента α при увеличении в связных дорожно-строительных материалах содержания битума наблюдается не только в отношении асфальтобетонов, но и для органоминеральных смесей с использованием переработанного асфальтобетона и комплексного вяжущего из битумной эмульсии и цемента.

5. Так как испытуемые образцы изготавливались из смесей ХО 32 ЭМ и А32НТ, отобранных на участке капитального ремонта автомобильной дороги, то в дальнейшем запланировано проведение мониторинга за отремонтированным участком дороги на предмет образования температурных трещин. Также предстоит уточнить влияние компонентов органоминеральной смеси на величину коэффициента температурного расширения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидату технических наук Беляеву Николаю Николаевичу за консультации по вопросу определения коэффициента температурного расширения, Гринфельду Евгению Александровичу за консультации по вопросу использования латекса для разделения сред, Зацепину Юрию Феликсовичу и Дунешенко Ольге Митрофановне за предоставленные для исследования смеси А32НТ, ХО 32 ЭМ и техническую документацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Печень В.Г.* Битумы и битумные композиции. М.: Химия, 1990. 256 с.
2. *Cizkova Zuzana, Suda Jan.* Viscoelastic behaviour of cold recycled asphalt mixes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. /URL: https://www.researchgate.net/publication/319860127_Viscoelastic_behaviour_of_cold_recycled_asphalt_mixes (дата обращения: 06.09.2020).

3. *Du Yinfei, Kong Lingxiang, Wei Tangzhong*. Laboratory investigation into early-age strength improvement of cold recycled asphalt mixture containing asphalt emulsion and cement // *Advances in Civil Engineering*. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/333741500_Laboratory_Investigation_into_EarlyAge_Strength_Improvement_of_Cold_Recycled_Asphalt_Mixture_Containing_Asphalt_Emulsion_and_Cement (дата обращения: 06.09.2020).
4. *Graziani Andrea, Mignini Chiara, Bocci Edoardo, Bocci Maurizio*. Complex modulus testing and rheological modeling of cold-recycled mixtures // *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/34467346_Complex_Modulus_Testing_and_Rheological_Modeling_of_Cold-Recycled_Mixtures (дата обращения: 06.09.2020).
5. *Pi Y., Li Y., Pi Y., Huang Z., Li Z.* Strength and micro-mechanism analysis of cement-emulsified asphalt cold recycled mixture // *MDPI and ACS Style*. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/1/128> (дата обращения: 06.09.2020).
6. *Graziani Andrea, Mignini Chiara, Bocci Edoardo, Bocci Maurizio*. Complex modulus of cold recycled mixtures: measurement and modeling. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/326033132_Complex_Modulus_of_Cold_Recycled_Mixtures_measurement_and_modelling (дата обращения: 06.09.2020).
7. *Dolzycki Bohdan, Jaczewski Mariusz, Szydłowski Cezary*. The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures // *Construction and Building Materials*. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320038026_The_long-term_properties_of_mineral-cement-emulsion_mixtures (дата обращения: 06.09.2020).
8. *Беляев Н.Н., Гесь Д.В.* Некоторые результаты измерения коэффициентов объемной температурной деформации // Доклады 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. 4. СПб.: СПбГАСУ, 2011. С. 14–16.
9. Пат. 2473732 Российская Федерация, МПК В01С 23/07 (2006.01). Способ оценки линейных температурных деформаций дорожно-строительных материалов и комплект оборудования для его осуществления / Н.Н. Беляев, Д.В. Гесь, Д.М. Скороходов: № RU2473732С1; заявл. 23.06.2011; опубл. 27.01.2013; Бюл. № 3. 8 с.
10. *Клинов И.Я.* Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы. М.: Машиностроение, 1967. 468 с.
11. *Сафончик В.И.* Защита от коррозии строительных конструкций и технологического оборудования. Л.: Стройиздат, 1988. 255 с.
12. *Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т.* Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
13. *Казанцев Е.И.* Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
14. *Мартынов Е.А.* Совершенствование методики расчета конструктивно-анизотропных многослойных жестких дорожных одежд на силовые и температурные воздействия: Дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2005. 196 с.
15. *Богуславский А.М., Богуславский Л.А.* Основы реологии асфальтобетона. М.: Высш. шк., 1972. 199 с.

Паневин Николай Иванович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: panevinn@mail.ru
Воронежский государственный технический университет
Гошовец Сергей Валерьевич, инж.; E-mail: goshovets@mail.ru
Воронежский государственный технический университет
Гошовец Никита Сергеевич, асп.; E-mail: nikgoshovets@mail.ru
Воронежский государственный технический университет

Получено 08.09.2020

Panevin Nikolay Ivanovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: panevinn@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

Goshovets Sergey Valerievich, Engineer; E-mail: goshovets@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

Goshovets Nikita Sergeevich, Post-graduate Student; E-mail: nikgoshovets@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

LINEAR THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS STUDY OF COLD ORGANIC-MINERAL MIXTURES WITH RECYCLED ASPHALT AND COMPLEX BINDER

The article is devoted to the research of cold organic-mineral mixtures using recycled asphalt concrete and a complex binder made of asphalt emulsion and Portland cement are widely used in the construction of road pavement basement. The method of road construction materials samples linear temperature expansion coefficients determining has been refined and tested. To determine the linear temperature expansion coefficients of samples made of asphalt concrete, crushed stone-sand mixture treated with an inorganic binder and organic-mineral mixture were carried out comparative tests.

Key words: cold organic-mineral mixture, coefficient of linear temperature expansion, critical stresses, coagulation and crystallization microstructural bonds.

REFERENCES

1. *Pechenny V.G.* Bitумы i bitumnye kompozitsii [Bitumens and bituminous compositions]. Moscow, 1990. 256 p. (in Russian)
2. *Cizkova Zuzana, Suda Jan.* Viscoelastic behaviour of cold recycled asphalt mixes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/319860127_Viscoelastic_behaviour_of_cold_recycled_asphalt_mixes (Accessed 06.09.2020).
3. *Du Yinfei, Kong Lingxiang, Wei Tangzhong.* Laboratory investigation into early-age strength improvement of cold recycled asphalt mixture containing asphalt emulsion and cement. *Advances in Civil Engineering*. 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333741500_Laboratory_Investigation_into_EarlyAge_Strength_Improvement_of_Cold_Recycled_Asphalt_Mixture_Containing_Asphalt_Emulsion_and_Cement (Accessed 06.09.2020).
4. *Graziani Andrea, Mignini Chiara, Bocci Edoardo, Bocci Maurizio.* Complex modulus testing and rheological modeling of cold-recycled mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334467346_Complex_Modulus_Testing_and_Rheological_Modeling_of_Cold-Recycled_Mixtures (Accessed 06.09.2020).
5. *Pi Y., Li Y., Pi Y., Huang Z., Li Z.* Strength and micro-mechanism analysis of cement-emulsified asphalt cold recycled mixture. *MDPI and ACS Style*. 2020. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/1/128> (Accessed 06.09.2020).
6. *Graziani Andrea, Mignini Chiara, Bocci Edoardo, Bocci Maurizio.* Complex modulus of cold recycled mixtures: measurement and modeling. 2018. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326033132_Complex_Modulus_of_Cold_Recycled_Mixtures_measurement_and_modelling (Accessed 06.09.2020).
7. *Dolzycki Bohdan, Jaczewski Mariusz, Szydłowski Cezary.* The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*. 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320038026_The_long-term_properties_of_mineral-cement-emulsion_mixtures (Accessed 06.09.2020).

8. *Belyaev N.N., Ges D.V.* Nekotorye rezul'taty izmereniya koeffitsientov ob'emnoy temperaturnoy deformatsii [Some results of measurement of volume temperature deformation coefficients]. Doklady 68-y nauchnoy konferentsii professorov, prepodavateley, nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta. Ch. 4. [Reports of the 68th scientific conference of professors, teachers, researchers, engineers and postgraduates of the University, Part IV]. Saint Petersburg, 2011. Pp. 14–16. (in Russian)
9. Pat. 2473732 Russian Federation, IPC B01C 23/07 (2006.01). Sposob otsenki lineynykh temperaturnykh deformatsiy dorozhno-stroitel'nykh materialov i komplekt oborudovaniya dlya ego osushchestvleniya [Method for evaluating linear temperature deformations of road construction materials and a set of equipment for its implementation]. N.N. Belyaev, D.V. Ges, D.M. Skorokhodov: No. RU2473732C1; appl. 23.06.2011; publ. 27.01.2013; Bull. No. 3. 8 p. (in Russian)
10. *Klinov I.Ya.* Korroziya khimicheskoy apparatury i korroziionnostoykie materialy [Corrosion of chemical equipment and corrosion-resistant materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1967. 468 p. (in Russian)
11. *Safonchik V.I.* Zashchita ot korrozii stroitel'nykh konstruktsiy i tekhnologicheskogo oborudovaniya [Protection from corrosion of building structures and technological equipment]. Leningrad, Sroyizdat, 1988. 255 p. (in Russian)
12. *Averko-Antonovich I.Yu., Bikmullin R.T.* Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov [Methods of research of structure and properties of polymers]. Kazan, 2002. 604 p. (in Russian)
13. *Kazantsev E.I.* Promyshlennyye pechi: Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya [Industrial furnaces. Reference guide for calculations and design]. Moscow, Metallurgiya, 1975. 368 p. (in Russian)
14. *Martynov E.A.* Sovershenstvovanie metodiki rascheta konstruktivno-anizotropnykh mnogosloynnykh zhestkikh dorozhnykh odezhd na silovye i temperaturnyye vozdeystviya [Improving the methodology for calculating constructively anisotropic multilayer rigid road coverings for power and temperature effects]. Omsk, 2005. 196 p. (in Russian)
15. *Boguslavskiy A.M., Boguslavskiy L.A.* Osnovy reologii asfal'tobetona [Fundamentals of asphalt concrete rheology]. Moscow, 1972. 199 p. (in Russian)