

УДК 536.2, 519.63, 51-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

М.Ю. Горский^{1,*}, Е.Н. Симчук^{1,**}, А.В. Бочкарев^{2,***}

¹Автономная некоммерческая организация «НИИ ТСК», Москва, 111024, Россия

²Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Россия

*e-mail: gorskiy@niitsk.ru

**e-mail: simchuk@niitsk.ru

***e-mail: ab2009sar@list.ru

Поступила в редакцию: 20.04.2024

После доработки: 20.04.2024

Принята к публикации: 02.05.2024

В статье приведены результаты моделирования температурных полей в многослойной дорожной одежде по результатам мониторинга на эксплуатируемой автомобильной дороге. Актуальность работы обусловлена высоким влиянием температуры на модули упругости асфальтобетона и, как следствие, на результаты испытаний по оценке прочности дорожных одежд, выполняемых в различных температурных условиях. В ходе исследований выполнен анализ данных, накопленных в течение длительного времени со станции температурного мониторинга, заложенной во время строительства автомобильной дороги. Предложена методика, основанная на решении задачи теплопроводности для каждого связного слоя дорожной одежды, принимающая во внимание непрерывность температуры и плотности теплового потока при переходе через межслойные границы, которая позволяет определить температурное поле в первом слое при неизвестной температуре на поверхности и уточнить механические и теплофизические параметры остальных слоев. Проведен анализ степени неоднородности распределения температуры по слоям в различные периоды года, допускающие проведение прочностных испытаний. Намечены направления дальнейших исследований по актуализации полученных методик с учетом применения современных типов асфальтобетонов в конструкциях дорожных одежд.

Ключевые слова: многослойные дорожные одежды, уравнение теплопроводности, оптимизация, определение теплофизических свойств, статистический анализ.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.315

OAI VDR

ВВЕДЕНИЕ

Своевременное получение полной, объективной и достоверной информации о транспортно-эксплуатационном состоянии и изменении условий работы является основной целью диагностики и мониторинга автомобильных дорог [1]. С учетом постоянно повышающихся транспортных нагрузок на автомобильные дороги, вопросы оценки их прочности постепенно выходят на первый план, наряду с определением продольной ровности, колеиности и наличия дефектов покрытия. Это обусловлено тем, что снижение параметров указанных показателей напрямую является следствием недостаточной прочности конструкций. Достоверная информация о прочности также позволяет принимать оптимальные решения о необходимости усиления

существующих конструкций или строительстве более капитальных дорожных одежд.

Наиболее широко применяемыми способами оценки прочности дорожных одежд являются испытания с использованием установок динамического нагружения (УДН). В отечественной практике методики испытаний регламентируются межгосударственным [2] и национальным стандартами [3]. При этом испытания позволяют оценить не только общую прочность конструкции, но и состояние отдельных нижележащих конструктивных слоев. Для практического достижения указанных целей используется решение обратной задачи по определению упругих параметров слоев дорожной одежды [4–9]. Математическая сложность решения обратной задачи заключается в высокой чувствительности результатов расчета к малым измене-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

ниям входных параметров. Одной из причин изменчивости входных параметров является сильная зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры и времени приложения нагрузки [10]. Причем если время приложения нагрузки при испытании задается измерительной установкой и является относительно стабильным параметром, то температуры асфальтобетона изменяются в широком диапазоне и зависят от множества таких факторов как время года, время суток, температура окружающего воздуха, солнечная активность, расположение участка автомобильной дороги на местности (наличия открытых или затененных мест) и т.д. Как показывают лабораторные исследования [10], модули упругости асфальтобетона с повышением температуры материала с 0 до 20 °С снижаются в 3–4 раза, а при повышении температуры до 40 °С, снижение модуля достигает 15 раз и более.

Практические измерения температуры на различных глубинах часто выявляют значительный температурный градиент [11], между тем в существующих методиках обратного расчета температура асфальтобетона принимается одинаковой по всей толщине. Второй важной проблематикой в учете температурных факторов является проведение температурной коррекции в условиях, когда значительная часть данных от УДН получена при больших температурных градиентах.

Цель настоящего исследования – с использованием данных, собранных с устройства температурного мониторинга, провести моделирование процессов вертикального теплопереноса в слоях дорожной одежды и затем при помощи статистической обработки результатов моделирования выявить наиболее вероятные распределения температур по толщине в зависимости от даты/времени суток обследования. Результаты настоящего исследования необходимы: 1) для оценки погрешности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд, которая вносится заменой реального распределения температур на усредненное распределение; 2) для совершенствования методики температурной коррекции, в процессе которой упругие параметры асфальтобетонных слоев приводятся к нормативной температуре.

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве источника экспериментальных данных в данном исследовании использовались

показания одной из станций удаленного мониторинга состояния дорожной одежды, установленной в 2018 г. на автомобильной дороге М-11 «Нева» Москва – Санкт-Петербург. Станция оснащена шестью датчиками температур, установленными на границах между слоями дорожной одежды и в глубине земляного полотна, и в исправном состоянии непрерывно передает показания этих датчиков с интервалом примерно в 30 мин. Согласно проектной документации, слои дорожной одежды, сверху вниз: щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-20 (6 см), плотный крупнозернистый асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (8 см), пористый крупнозернистый асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (15 см), щебеночная смесь (48 см) и песок мелкий (60 см) поверх существующего земляного полотна (рис. 1). Таким образом, связные слои, распределение температуры по глубине которых необходимо установить, включают три слоя общей проектной толщиной 29 см.

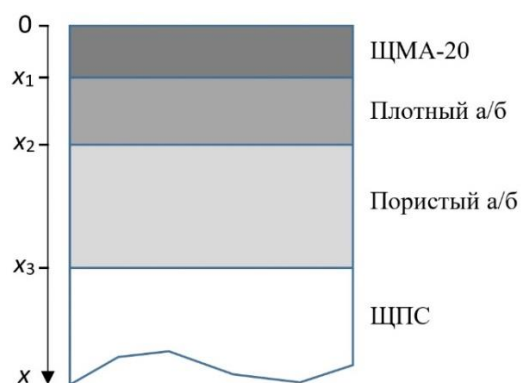


Рис. 1. Структура дорожной одежды

Временные ряды, сформированные показаниями датчиков температуры, обладают определенными недостатками.

1. 30-минутный интервал измерений поддерживается нестрого, что связано, по всей видимости, с особенностями передачи информации по стандарту GSM. В последовательности моментов времени измерений за три года функционирования станции с июня 2018 г. по август 2021 г. присутствуют как кратковременные пропуски от 1 ч, так и длительные, вплоть до нескольких месяцев, связанные с выходом из строя аккумуляторных батарей.

2. Ограниченная точность измерения температуры, равная 0.1 °С, придает графикам зависимости температуры от времени характерный пилообразный вид, что затрудняет надежное вычисление тепловых потоков на межслойных границах при малых вариациях температуры.

Первый недостаток устранить не сложно: в данных мониторинга за три года обнаруживается промежуток практически непрерывных изменений с января по декабрь 2019 г., который был пересчитан при помощи линейной интерполяции для множества равноотстоящих моментов времени с шагом ровно 30 мин.

Второй недостаток может быть, на первый взгляд, легко устранен любым методом сглаживания кривых, например методом скользящего среднего – но степень сглаживания требует теоретического обоснования.

Для упрощения обоснования слои дорожной одежды принимаются однородными, неограниченными в горизонтальной плоскости и имеющими постоянную толщину. В таких предположениях распространение тепла от поверхности дорожной одежды, температура которой определяется погодными условиями, в направлении земляного полотна может моделироваться при помощи уравнения линейной теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где u – температура; t – время; x – координата, отсчитываемая по вертикали вниз от поверхности дорожной одежды; $a^2 = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, зависящий от коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности ρ вещества.

Уравнение (1) имеет известное частное решение, описывающее распространение гармонической тепловой волны вглубь полубесконечного однородного полупространства $x \geq 0$:

$$u(x, t) = e^{-\alpha x} \sin(kx - 2\pi \nu t), \quad (2)$$

в котором коэффициент затухания α , волновое число k и частота ν связаны соотношениями

$$\alpha = k, \quad \pi \nu = a^2 k^2. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что по мере распространения вглубь полупространства амплитуда гармонической волны экспоненциально затухает, причем скорость этого затухания возрастает с частотой. Если на поверхности полупространства задать произвольное периодическое колебание температуры, то амплитуды дискретных Фурье-образов (спектры) колебаний температуры, возникающих на глубинах x и $x+h$, свяжет следующая зависимость:

$$\frac{|U(x+h, \nu)|}{|U(x, \nu)|} = \exp\left(-\frac{\sqrt{\pi \nu}}{a} h\right). \quad (4)$$

Согласно ГОСТ Р 59918 [3], измерения при помощи установки динамического нагружения разрешено проводить только при положительных температурах во всех слоях дорожной одежды – данное требование вынуждает нас ограничиться в дальнейшем анализе периодом с 18 апреля по 27 октября 2019 г., называемым в дальнейшем расчетным. На рис. 1 сплошными линиями отложены натуральные логарифмы сглаженных наблюдаемых спектров U_1 , U_2 и U_3 колебаний температуры в местах расположения первых трех датчиков на глубинах 6, 14 и 29 см, соответственно.

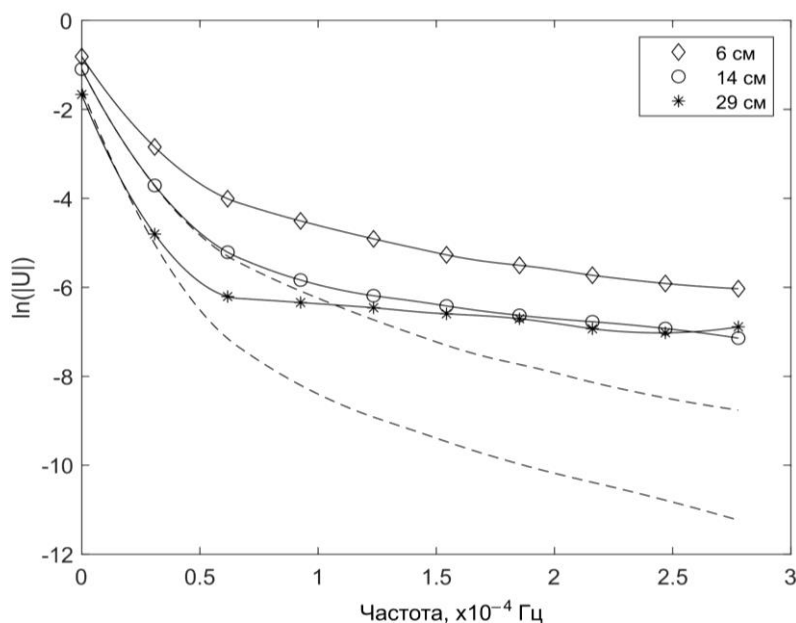


Рис. 2. Наблюдаемые и теоретические спектры температуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Пунктирные линии на рис. 2 показывают теоретические спектры $\tilde{U}_2$ и $\tilde{U}_3$, которые мы могли бы ожидать в предположении, необходимом для выполнения зависимости (4), что коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c и плотность ρ всех слоев дорожной одежды одинаковы (и отвечают средним значениям для горячего плотного асфальтобетона). Как видим, в области малых частот от нуля до $0.3 \cdot 10^{-4}$ Гц теоретические и наблюдаемые спектры практически совпадают; напротив, наблюдаемые амплитуды в области высоких частот превышают теоретические амплитуды в 5 раз для второго датчика и более чем в 20 раз для третьего. Это

расхождение объясняется упомянутой выше зашумленностью временных рядов температуры для 2 и 3 датчиков, появляющейся из-за ограниченной точности измерения температуры. Коррекция спектра наблюдаемых температур заключается в приведении спектра к теоретическому виду умножением на специальный поправочный коэффициент $C(\nu)$ и действует подобно фильтру нижних частот на радиосигнал. После выполнения обратного дискретного преобразования Фурье получаем сглаженный график температуры с теоретически обоснованной степенью сглаживания (рис. 3).

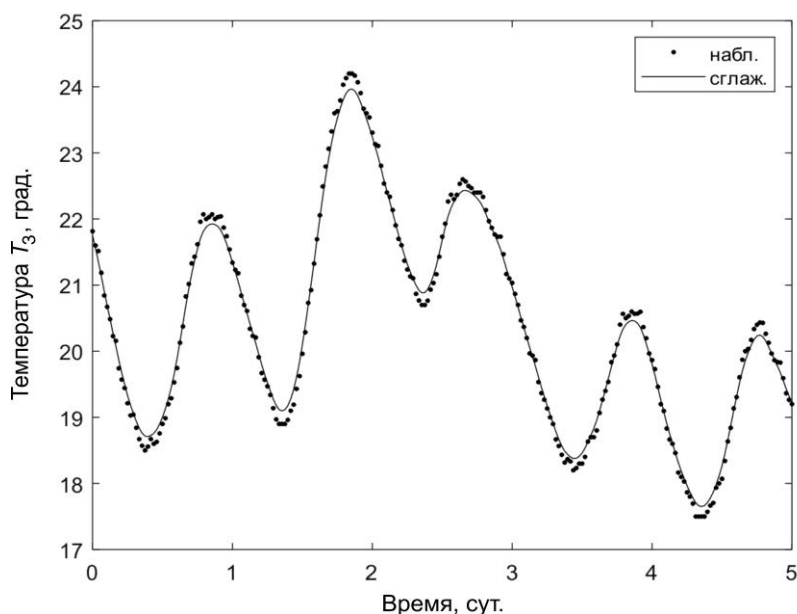


Рис. 3. Наблюдаемая и сглаженная зависимости температуры на третьем датчике (глубина 29 см)

УТОЧНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ

Как следует из теории, распределение температур по слою $x_L \leq x \leq x_R$ в произвольный момент времени $0 \leq t < \infty$, удовлетворяющее уравнению теплопроводности (1), полностью определяется начальным условием и граничными условиями первого рода

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x), \\ u(x_L, t) &= u_L(t), \quad u(x_R, t) = u_R(t) \end{aligned} \quad (5)$$

для широкого класса функций $u_0(x)$, $u_L(t)$, $u_R(t)$ [12]. Очевидно, чем большее время про-

ходит с начала наблюдения, тем меньшее влияние на имеющееся распределение температур оказывает начальное условие — численные оценки показывают, что в нашем случае при $t > 1$ сут. влиянием начальных условий на результат можно пренебречь.

Задача моделирования температур сталкивается с двумя проблемами. Во-первых, физические условия требуют непрерывности изменения как температур, так и тепловых потоков при переходе через межслойные границы, и при заданных коэффициентах температуропроводности a^2 задача расчета температур в слоях плотного и пористого асфальтобетона оказывается переопределенной, поскольку решение этой задачи однозначно определяется температурами на границах слоев, и для обеспечения равенства

тепловых потоков не хватает варьируемых параметров. Во-вторых, станция мониторинга не сообщает температуру на поверхности ($x=0$) и задача теплопроводности для слоя ЩМА-20 является недоопределенной – в ней не хватает одного граничного условия. В качестве недостающего граничного условия можно назначить тепловой поток через границу $x=x_1$, но этот поток становится известным только после решения задачи теплопроводности для слоя плотного асфальтобетона ($x_1 \leq x \leq x_2$), поэтому сначала нужно разобраться с первой проблемой.

Для решения первой проблемы написана программа численного решения задачи теплопроводности однородного слоя (1), (5) методом конечных разностей. Незвестные начальные условия определялись из линейной интерполяции известных температур на границах слоя в начальный момент. Граничные условия определялись сглаженными зависимостями температур от времени на первых трех датчиках (расположенными в точках с координатами $x=x_1$, $x=x_2$ и $x=x_3$), измеренными в произвольный промежуток времени длительностью 5 сут. в расчетном периоде. В качестве варьируемых параметров назначались толщины, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости слоев плотного и пористого асфальтобетона; плотности принимались фиксированными и равными 2400 кг/м^3 для плотного асфальтобетона и 2300 кг/м^3 для пористого [13]. Задача оптимизации, решаемая по методу Левенберга-Марквардта, состояла в подборе таких значений варьируемых параметров, которые обеспечивали минимум целевой функции

$$\sum_n \left[Q_2^{\text{down}}(t_n) - Q_3^{\text{up}}(t_n) \right]^2, \quad (6)$$

где Q_2^{down} и Q_3^{up} – плотности теплового потока через нижнюю границу второго слоя (плотный асфальтобетон) и через верхнюю границу третьего слоя (пористый асфальтобетон), соответственно. Начальные значения варьируемых параметров выбирались равными, соответственно, проектным значениям толщин и табличным значениям коэффициента теплопроводности и теплоемкости для горячего плотного асфальтобетона.

В результате решения серии задач оптимизации установлено, что наилучшее совпадение тепловых потоков Q_2^{down} и Q_3^{up} (рис. 4) достигается при следующих значениях варьируемых параметров (табл. 1).

Необходимо обратить внимание, что толщины слоев, приведенные в табл. 1, оказались ниже проектных значений. Это может быть обусловлено допусками по толщинам при строительстве, возможным смещением датчиков температуры от межслойных границ и заводскими погрешностями самих датчиков. Также, согласно выполненному расчету, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость пористого асфальтобетона превышают соответствующие показатели плотного асфальтобетона, что можно объяснить повышенным объемом пустот и, как следствие, возможной повышенной влажностью пористого асфальтобетона, находящегося на границе с неукрепленным слоем основания.

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

После нахождения температур во втором и третьем слоях, вычисляем плотность теплового потока Q_2^{up} на верхней границе второго слоя и вычисляем температуры в первом слое (ЩМА-20), используя пару условий для нижней границы этого слоя:

$$u(x_1, t) = u_1(t), \quad \lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x}(x_1, t) = Q_2^{\text{up}}. \quad (7)$$

Первое из условий (7) задает температуру, используя показания первого датчика $u_1(t)$, второе обеспечивает непрерывность теплового потока на границе между первым и вторым слоями. Вычисления температуры производятся методом конечных разностей с помощью равенств

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= 2u_{i,j+1} - u_{i,j+2} + \\ &+ \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}), \quad i=2, \dots, N_t-1, \\ u_{1,j} &= 2u_{1,j+1} - u_{1,j+2} + \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{3,j} - u_{1,j}), \\ u_{N_t,j} &= 2u_{N_t,j+1} - u_{N_t,j+2} + \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{N_t,j} - u_{N_t-2,j}), \end{aligned} \quad (8)$$

полученных из уравнения теплопроводности (1) заменой частных производных на разностные аналоги второго порядка точности для сеточной функции $u_{i,j}$. Здесь i, j – индексы дискретных времени и координаты, $i=1, \dots, N_t$, $j=1, \dots, N_x$; $\Delta x, \Delta t$ – шаги разностной сетки.

Для запуска расчета из условий (7) находим значения сеточной функции в двух последних слоях разностной сетки u_{i,N_x-1} и u_{i,N_x} , после

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

чего вычисляем неизвестные значения в слоях сетки с номерами, последовательно уменьшающимися с $j = N_x - 2$ по $j = 1$. Вычисленные се-

точные значения $u_{i,1}$, $i = 1, \dots, N_t$ определяют искомую температуру на поверхности дорожной одежды.

Таблица 1. Оптимальные значения параметров

Слой	Толщина, см	Коэффициент теплопроводности, Вт/м ² · К	Удельная теплоемкость, Дж/кг · К
Плотный асфальтобетон	7.2	1.0	710
Пористый асфальтобетон	12.9	1.4	830

Разностная схема (8) является неустойчивой и нуждается в контроле погрешности. Контроль обеспечивается вычислением температур внутри слоя ЦМА-20 по стандартной устойчивой разностной схеме для граничных условий первого рода [12], с известными температурами на верхней и нижней поверхностях слоя – первая из них определяется из расчета по формулам

(8), вторая – из показаний датчика температуры. Оказалось, что при $N_x = 24$, $N_t = 48 \cdot \Delta T$, где ΔT обозначает длительность расчетного времени в сутках, относительная погрешность не превышает 0.5 %. Пример результатов расчета показан на рис. 5.

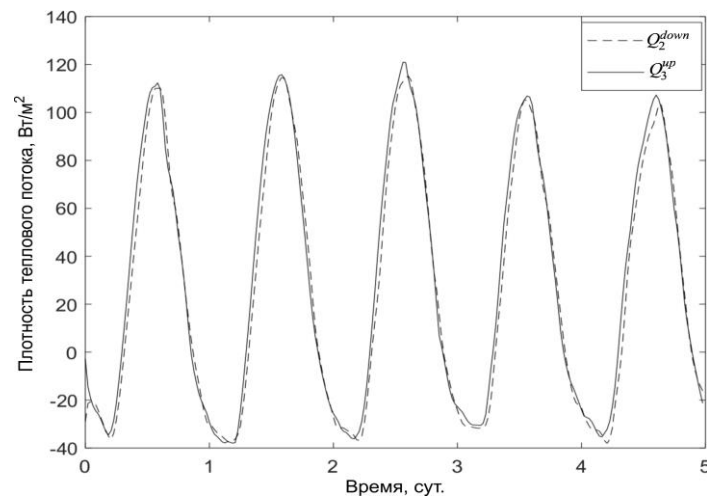


Рис. 4. Плотности тепловых потоков Q_2^{down} и Q_3^{up} , рассчитанные для промежутка времени с 16 по 20 мая 2019 г.

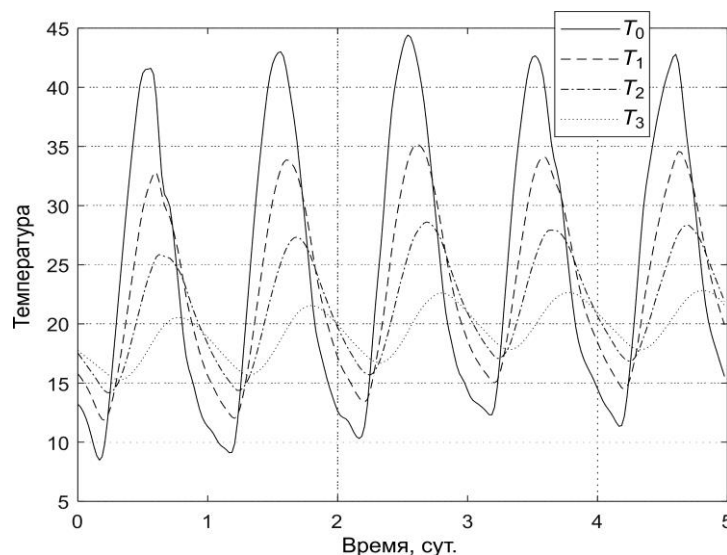


Рис. 5. Измеренные температуры $T_1 - T_3$ и вычисленная температура на поверхности T_0

ОБРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Обозначим температуру дорожной одежды на поверхности как T_0 , а температуры на границах между первым и вторым слоями, вторым и третьим слоями, и на нижней границе треть-

го слоя как T_1, T_2, T_3 . Из табл. 2, составленной для расчетного периода, следует, что максимальное суточное изменение температуры на поверхности дорожной одежды превосходит 35°C . При этом максимум разности температур между верхней и нижней границами пакета асфальтобетонных слоев достигает 26°C .

Таблица 2. Показатели неоднородности температурного поля

Показатели	Минимум	Максимум	Среднее
Суточное изменение T_0 , град.	2.6	35.6	19.3
Разность $T_0 - T_3$, град.	-10.1	26.2	2.7
Температурный градиент dT/dx в 1-м слое, град./см	-1.4	2.1	0.1

На рис. 6 приведено измерение температур $T_0 - T_3$ в течение суток 4 июня 2019 г., когда было зафиксировано максимальное суточное изменение температуры. Рост температуры начинается после восхода солнца и уже примерно к 10:30 температура на поверхности достигает 40°C – максимально разрешенной температуры для проведения испытаний согласно [3].

Как известно, модуль упругости асфальтобетона существенно зависит от температуры. Для уточнения характера этой зависимости обратимся к теоретическим и экспериментальным оценкам. На рис. 7 приведены теоретические модули упругости плотного и пористого асфальтобетонов, устроенных в рассматриваемой конструкции, которые соответствуют длительности импульсного нагружения 30 мс (типичного для установок динамического нагружения), рассчитанные согласно методике монографии [14]. На рис. 8 представлены экспериментально определенные в лаборатории согласно методике [15] динамические модули упругости различных типов современных асфальтобетонов на одном битумном вяжущем PG 64-22, соответствующие частоте переменной нагрузки 25 Гц. Как видим, экспериментальные и теоретические результаты вполне согласуются между собой и показывают, что для широкого круга асфальтобетонов увеличение температуры от 0 до 40°C приводит к уменьшению модуля упругости от 8 до 15 раз, а приращение температуры всего на 8°C приводит к двукратному уменьшению модуля упругости при средних и высоких температурах. Это может указывать на то, что замена слоя асфальтобетона с двукратной или большей вариацией модуля упругости по толщине на однородный слой, как это происходит при обра-

ботке результатов измерения установкой динамического нагружения, нуждается в актуализации.

Между тем, если в расчетном периоде ограничиться светлым временем суток (в темное время суток испытания по оценке прочности, как правило, не проводятся) и поверхностными температурами T_0 от 0 до 40°C , то относительная частота случаев, когда разность максимальной и минимальной температур ΔT в асфальтобетонных слоях превышает 8°C , составляет 33 %. Более детально, в диапазоне $0 < T_0 \leq 10$ шанс встретить $\Delta T > 8$ составляет всего 2 %, при $10 < T_0 \leq 20$ – 5 %, при $20 < T_0 \leq 30$ – 34 % и при $30 < T_0 \leq 40$ – 94 %. Таким образом, при поверхностных температурах от 20 до 30°C некорректные данные могут быть получены более чем в одной трети случаев, а при температурах выше 30°C – почти во всех случаях. Если попытаться обойти проблему, снизив максимально допустимую поверхностную температуру, при которой разрешены измерения, с 40 до 20°C , то мы столкнемся с другой проблемой – резкое снижение КПД использования светлого времени суток. На рис. 9 показан график процента светлого времени суток, при котором температура на поверхности оказывается ниже 20°C .

Исходя из наблюдений за температурным режимом в месте выполнения мониторинга, летний период 2019 г. не отличался аномально жаркими температурами, тем не менее измерения в июне и с середины августа по середину сентября при таком ограничении температуры проводить было бы практически невозможно. Суммарная доля пригодного для измерений времени снижается с 96 до 47 % при понижении допустимой температуры с 40 до 20°C – и это

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

без учета стандартного диапазона рабочего времени с 8:00 до 17:00. С учетом последнего ограничения доля пригодного времени уменьшается до 33 %, причем для измерения можно использовать только вторую половину сентября и октябрь. В относительно теплые месяцы с ап-

реля по август при ясной погоде температура поверхности быстро поднимается выше 20 °С и в течение светового дня для измерений остаются подходящими не более нескольких часов после восхода солнца и перед закатом.

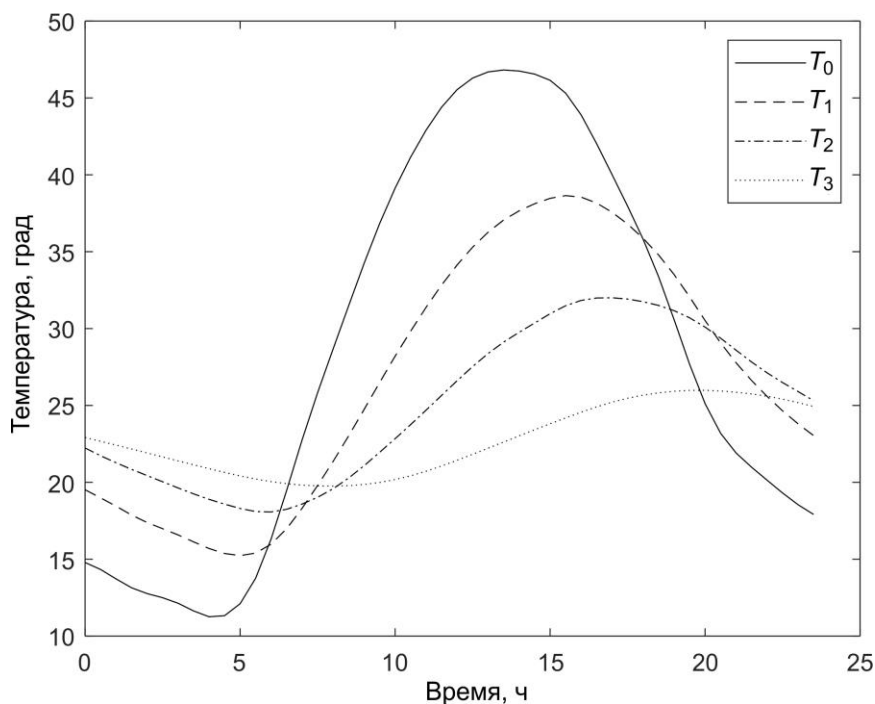


Рис. 6. Изменение межслойных температур в течение суток 4 июня 2019 г.

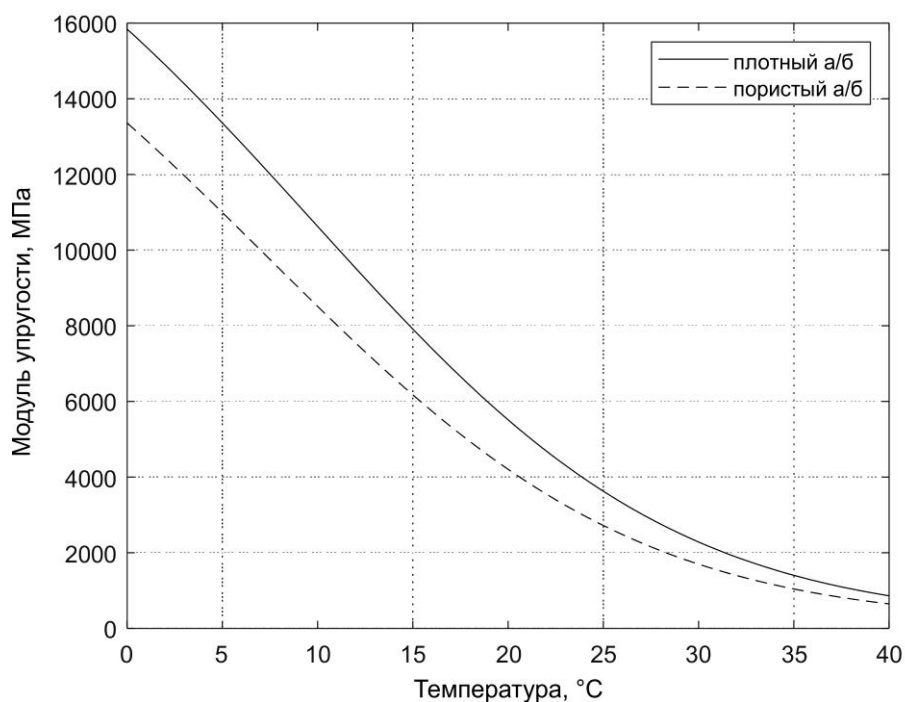


Рис. 7. Теоретическая зависимость модуля упругости разных типов асфальтобетона (а/б) от температуры

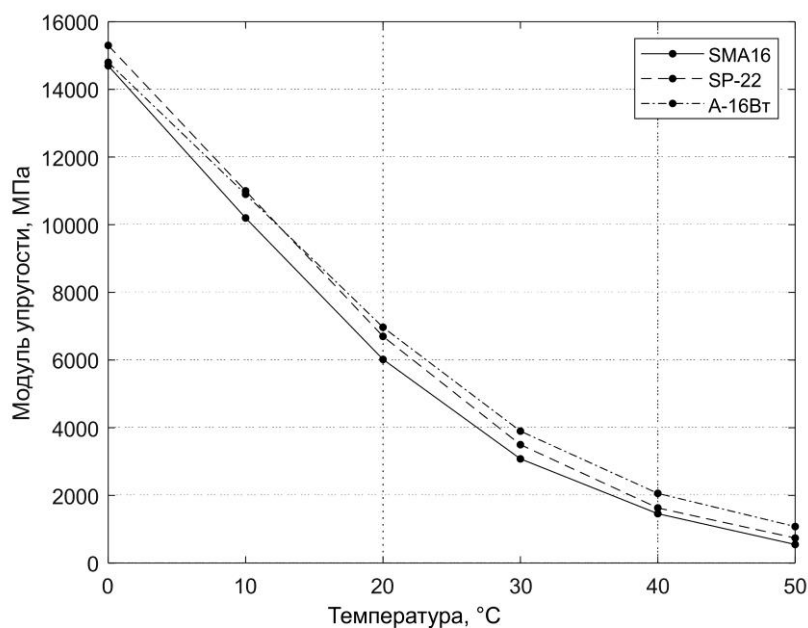


Рис. 8. Экспериментальная зависимость модуля упругости различных асфальтобетонных смесей от температуры [10]

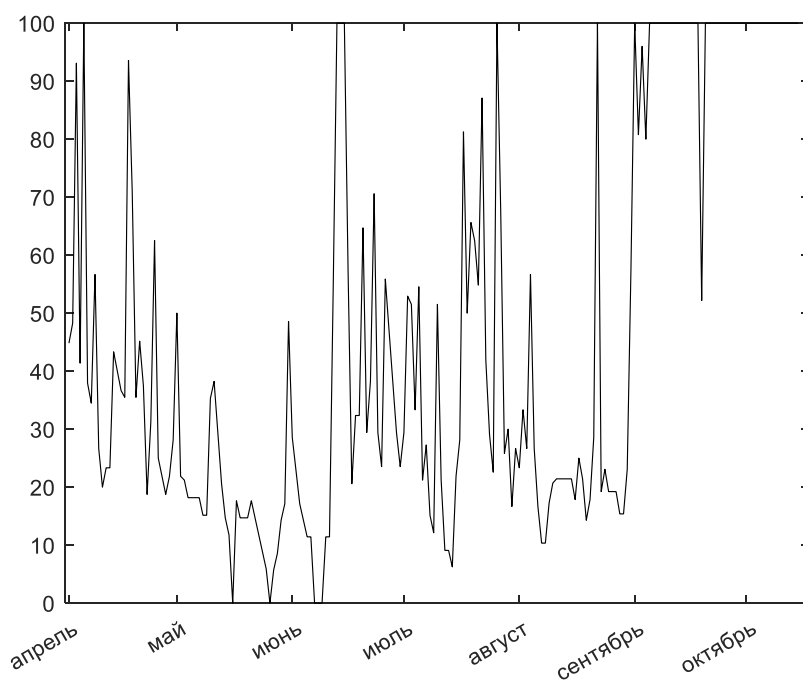


Рис. 9. Доля светлого времени суток (в %), при которой температура на поверхности дорожной одежды не превышает 20 °C

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Предложенная методика, основанная на решении задачи теплопроводности для каждого связного слоя дорожной одежды, принимающая во внимание непрерывность температуры и плотности теплового потока при переходе через межслойные границы, позволяет не только найти температуры в первом слое при известной температуре на поверхности, но и уточнить

механические и теплофизические параметры слоев, в частности толщины, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости.

Существующая методика обратного расчета упругих параметров слоев дорожной одежды на основании измерений, проводимых установкой динамического нагружения [3], предполагает неизменность упругих параметров в пределах одного слоя. Модуль упругости асфальтобетона обладает высокой чувствительностью к темпе-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

ратуре; теплообмен между поверхностью дорожной одежды и окружающей средой, с учетом нагрева солнечным излучением, охлаждения выпадающими осадками и движущимися приповерхностными воздушными массами и прочих факторов, приводят к тому, что в то время суток/года, которое пригодно для проведения измерений, распределение температуры по асфальтобетонным слоям, как правило, отличается существенной неоднородностью. Результаты обратного расчета с последующим приведением упругих параметров к нормативной температуре (температурная коррекция) могут иметь определенные значительные разбросы при изменении модуля упругости в пределах асфальтобетонного слоя в два и более раз. Проведение измерений только в те часы/дни, которые обеспечивают приемлемо малую неоднородность свойств, значительно уменьшает коэффициент использования рабочего времени или вынуждает отбраковывать большую часть результатов измерений. Выход видится в совершенствовании методик обратного расчета и температурной коррекции, с тем чтобы обеспечить их работу в условиях высокой неоднородности упругих параметров асфальтобетона.

Для выполнения обозначенных задач будут продолжены исследования температурных параметров асфальтобетонных слоев на действующих автомобильных дорогах в различных регионах путем устройства станций мониторинга, накопления и анализа получаемых на них данных. Для этого будет подобрано соответствующее оборудование, позволяющее минимизировать погрешности получаемых результатов, разработана методика мониторинга и актуализированы полученные в рамках выполнения данных исследований параметры с учетом применения современных типов асфальтобетонов и битумных вяжущих, входящих в их состав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОДМ 218.4.039-2018. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог. Росавтодор. М.: Информавтодор, 2018. 60 с.
2. ГОСТ 32729-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба жестких дорожных одежд для определения прочности. М.: Стандартинформ, 2014. 6 с.
3. ГОСТ Р 59918-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Жесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 50 с.
4. Углова Е.В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2009. № 2 (23). С. 170–178.
5. Углова Е.В., Тиратуриян А.Н., Мизонов В.В. Разработка теоретических основ «обратного» расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции на стадии эксплуатации // Известия Ростовского государственного строительного университета, 2011. № 15. С. 84–89.
6. Тиратуриян А.Н., Углова Е.В. Программный комплекс для «обратного» расчета динамических модулей упругости эксплуатируемых дорожных конструкций с учетом параметров воздействия установок нагружения дорожных одежд // Научное издание: интернет-журнал, 2012. № 3 (12). URL: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (дата обращения 16.04.2024).
7. Бочкарев А.В. Анализ надежности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, 2022. № 3 (33). С. 5–18.
8. Бочкарев А.В., Землянухин А.И. Обратное вычисление послойных модулей упругости дорожных одежд // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2022. № 3(94). С. 5–18.
9. Тиратуриян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2023. № 1. С. 56–65.
10. Кадыров Г.Ф., Горский М.Ю., Жданов К.А., Симчук Е.Н. Исследование модулей упругости щебеночно-мастичного асфальтобетона для расчета конструкций дорожных одежд // Дороги и мосты, 2023. № 1(49). С. 273–297.
11. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба жестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225.
12. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
13. ОДН 218.046-01. Проектирование жестких дорожных одежд. М.: Информавтодор, 2001. 104 с.
14. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы: «Білім» баспасы, 2013. 152 с.
15. ГОСТ Р 58401.21-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки динамического нагружения (АМРТ). М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

MODELING OF TEMPERATURE FIELDS IN MULTILAYER ROAD PAVEMENTS BASED ON MONITORING DATA

M.Yu. Gorskiy^{1,*}, E.N. Simchuk^{1,}, A.V. Bochkarev^{2,***}**

¹*Autonomous non-profit organization "NII TSK", Moscow, 111024, Russia*

²*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russia*

*e-mail: gorskiy@niitsk.ru

**e-mail: simchuk@niitsk.ru

***e-mail: ab2009sar@list.ru

Received April 20, 2024; revised April 20, 2024; accepted May 02, 2024

The article presents the results of modeling temperature fields in multi-layer road pavement based on monitoring results on an operating road. The relevance of the work is due to the high influence of temperature on the elastic moduli of asphalt concrete, and, as a consequence, on the results of tests to assess the strength of road pavements performed under different temperature conditions. The research included an analysis of data accumulated over a long period of time from a temperature monitoring station installed during the construction of the highway. A technique is proposed based on solving the problem of thermal conductivity for each cohesive layer of road pavement, taking into account the continuity of temperature and heat flux density when passing through interlayer boundaries, which makes it possible to determine the temperature field in the first layer at an unknown temperature on the surface and clarify the mechanical and thermophysical parameters of the rest layers. An analysis was carried out of the degree of heterogeneity of temperature distribution across layers in different periods of the year, allowing for strength tests. Directions for further research are outlined to update the obtained methods, taking into account the use of modern types of asphalt concrete in road pavement structures.

Keywords: multilayer pavements, thermal conductivity equation, optimization, determination of thermophysical properties, statistical analysis.

REFERENCES

1. ODM 218.4.039-2018. Rekomendacii po diagnostike i ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog [Recommendations for diagnosing and assessing the technical condition of highways]. Moscow, Informavtodor, 2018. 60 p. (in Russian).
2. GOST 32729-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Metod izmereniya uprugogo progiba nezhestkih dorozhnyh odezhd dlya opredeleniya prochnosti [State Standard 32729-2014. Public roads. Method for measuring elastic deflection of flexible pavements to determine strength]. Moscow, Standartinform, 2014. 6 p. (in Russian).
3. GOST R 59918-2021. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Nezhestkie dorozhnye odezhd. Metodiki ocenki prochnosti [State Standard 59918-2021. Public roads. Non-rigid road pavements. Methods for assessing strength]. Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2022. 50 p. (in Russian).
4. Uglova E.V. Ocenka modulej uprugosti sloev dorozhnoj odezhd na stadii ekspluatatsii avtomobil'nyh dorog [Estimation of elastic moduli of pavement layers at the stage of highway operation], Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2009. No. 2(23). Pp. 170–178 (in Russian).
5. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Mizonov V.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov «obratnogo» rascheta modulej uprugosti sloev dorozhnoj konstrukcii na stadii ekspluatatsii [Development of theoretical foundations for the «reverse» calculation of the modulus of elasticity of layers of a road structure at the operational stage], Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta, 2011. No. 15. Pp. 84–89 (in Russian).
6. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Programmnyj kompleks dlya «obratnogo» rascheta dinamicheskikh modulej uprugosti ekspluatiruemyh dorozhnyh konstrukcij s uchetom parametrov vozdejstviya ustanovok nagruzeniya dorozhnyh odezhd [Software package for “reverse” calculation of dynamic moduli of elasticity of road structures in use, taking into account the parameters of the influence of road pavement loading installations], Naukovedenie: internet-zhurnal, 2012. No. 3(12) (in Russian) Available at: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (accessed 16.04.2024).
7. Bochkarev A.V. Analiz nadezhnosti obratnogo rascheta uprugih parametrov dorozhnyh odezhd [Reliability analysis of reverse calculation of elastic parameters of road pavements], Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura, 2022. No. 3(33). Pp. 5–18 (in Russian).
8. Bochkarev A.V., Zemlyanuhin A.I. Obratnoe vychislenie poslojnyh modulej uprugosti dorozhnyh

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

odezhd [Reverse calculation of layer-by-layer elastic moduli of road pavements], Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2022. No. 3(94). Pp. 5–18 (in Russian).

9. *Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V.* Sovershenstvovanie nerazrushayushchego metoda opredeleniya mekhanicheskikh harakteristik elementov mnogoslojnykh konstrukcij na primere dorozhnykh odezhd [Improving a non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures using the example of road pavements], Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2023. No. 1. Pp. 56–65 (in Russian).

10. *Kadyrov G.F., Gorskij M.Yu., Zhdanov K.A., Simchuk E.N.* Issledovanie modulej uprugosti shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona dlya rascheta konstrukcij dorozhnykh odezhd [Study of the elastic moduli of crushed stone-mastic asphalt concrete for the calculation of road pavement structures], Dorogi i mosty, 2023. No. 1(49). Pp. 273–297 (in Russian).

11. *Gorskij M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E.* Ocenka vliyaniya temperaturnykh faktorov na parametry chashi progiba nezhestkikh dorozhnykh odezhd na osnove ispytaniy prochnosti ustanovkami dinamicheskogo nagruzheniya [Assessment of the influence of temperature factors on the deflection parameters of flexible road pavements based on strength tests using dynamic loading installations], Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2023. Vol. 25. No. 4. Pp. 211–225 (in Russian).

12. *Tihonov A.N., Samarskij A.A.* Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka, 1977. 736 p. (in Russian).

13. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design of flexible pavements]. Moscow, Informavtodor, 2001. 104 p. (in Russian).

14. *Radovskij B.S., Teltaev B.B.* Vyazkouprugie harakteristiki bituma i ih ocenka po standartnym pokazatelyam [Viscoelastic characteristics of bitumen and their assessment using standard indicators]. Almaty, Bilim, 2013. 152 p. (in Russian).

15. GOST R 58401.21-2019 Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Smesi asfal'tobetonnye dorozhnye i asfal'tobeton. Metody opredeleniya dinamicheskogo modulya uprugosti i chisla tekuchesti s ispol'zovaniem ustanovki dinamicheskogo nagruzheniya (AMPT) [Public roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Methods for determining the dynamic modulus of elasticity and yield number using the dynamic loading setup (AMPT)]. Moscow, Standartinform, 2019. 15 p.