

УДК 625.855

Ларина Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, larti50@mail.ru
Зубарев Никита Романович, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, znic95@mail.ru

МЕТОД ОЦЕНКИ КИНЕТИКИ ИЗНОСА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация. В данной статье предложен метод оценки термодинамического состояния асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, характеризующий кинетику процесса износа. Проведены исследования изменения температурного режима под действием движущегося транспорта по полосам движения на МКАД и Ленинградском проспекте с помощью тепловизора. Получены термограммы верхнего слоя покрытия при движении автомобильного транспорта в зимний, летний и осенне-весенний периоды, которые иллюстрируют процессы, происходящие в верхнем слое покрытия.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие; износ; полоса наката; тепловизор; термограмма; силовые параметры транспорта; энергообмен; рассеивание энергии; скорость движения; интенсивность движения; снижение толщины слоя; термодинамическое состояние.

Larina Tatyana A., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, larti50@mail.ru
Zubarev Nikita R., undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, znic95@mail.ru

METHOD FOR ESTIMATING THE KINETICS OF WEAR OF ASPHALT-CONCRETE COATINGS OF AUTOMOBILE ROADS

Abstract. This article proposes a method for assessing the thermodynamic state of asphalt concrete pavements of highways, which characterizes the kinetics of the wear process. Studies of changes in temperature under the action of moving vehicles along the lanes on the Moscow Ring Road and Leningradsky Prospect using a thermal imager have been carried out. Thermograms of the upper layer of the coating were obtained during the movement of motor vehicles in the winter, summer and autumn-spring periods, which illustrate the processes occurring in the upper layer of the coating.

Key words: asphalt concrete pavement; wear; track; thermal imager; thermogram; power parameters of transport; power interchange; energy dissipation; rate of motion; vehicle density; reduced layer thickness; thermodynamic conditions.

Введение

Развитие деформаций и внутренних напряжений в верхнем слое покрытия во времени под влиянием движущихся автомобилей (кинетика

износа), можно визуально зафиксировать путем создания термограммы. Температура слоя зависит от процессов взаимодействия внутренних и внешних сил. Современные тепловизоры позволяют зафиксировать изменение температуры под колесом автомобиля с точностью до десятых долей градусов за доли секунды. Их можно рекомендовать для диагностики состояния покрытия под колёсами движущегося транспорта и количественной характеристики кинетики развития износа. Износ слоя в полосе наката сопровождается образованием колеи. И, как следствие, ухудшает условия безопасности дорожного движения и создает неудобство для водителей и пассажиров, и снижает срок службы верхнего слоя.

При движении автомобиля в слое покрытия возникают внутренние напряжения, которые распространяются на смежные полосы. На многополосных магистралях происходит наложение напряжений от автомобилей, движущихся по соседним полосам, что вызывает повышенный износ.

Если рассмотреть многополосные дороги Москвы, то следует отметить высокий износ покрытий на левых полосах движения, предназначенных для пропуска легкового транспорта.

Основная часть

Слой уплотненного покрытия в первом приближении можно считать упругим телом, которое после прекращения внешнего силового воздействия (съезда колеса автомобиля) стремится полностью восстановить свои первоначальные размеры и форму.

Все силы, которые действуют на покрытие со стороны автомобиля, по аналогии с физикой назовем внешними силами. А силы взаимодействия между частицами в слое – внутренними силами [1].

ЩМА и мелкозернистый асфальтобетон верхнего слоя покрытия всегда являются полидисперсными системами, с размером зерен от $1 \cdot 10^{-3}$ до 20 мм, крупность отдельных зерен изменяется на 4 порядка. В соответствии с размером зерен каждая частица обладает своей кинетической энергией, полученной от движущегося колеса автомобиля [2].

Упругий прогиб от действия легкового транспорта практически не возникает, а на слой покрытия передаются тангенциальные и касательные напряжения σ_x (рис. 1), которые достигают максимальных значений на 4 и 5 полосах движения (рядом с парапетным ограждением).

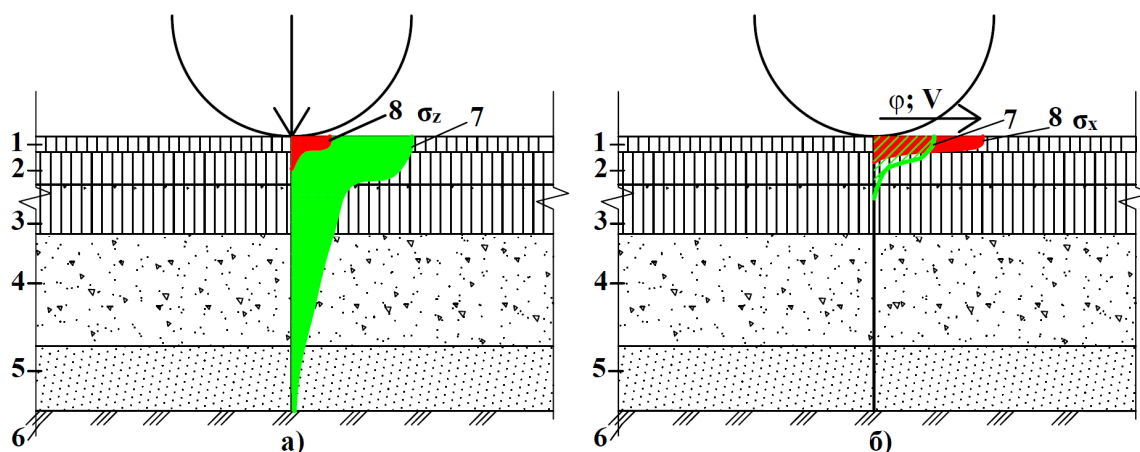


Рис. 1. Напряжения от автомобильных колёс в многослойной дорожной одежде:
 а – эпюра вертикальных напряжений σ_z ; б – эпюра горизонтальных напряжений σ_x ;
 1 – верхний слой покрытия; 2 – нижний слой покрытия; 3 – верхний слой основания;
 4 – нижний слой основания; 5 – дополнительный слой основания;
 6 – подстилающий грунт; 7 – напряжения от грузового автомобиля;
 8 – напряжения от легкового автомобиля

На участках торможения и разгона автомобилей увеличиваются горизонтальные усилия, направленные в сторону противоположную движению. Из-за большой маневренности легковых автомобилей в движущемся потоке (частое перестроение из ряда в ряд, сопровождающееся торможением и разгоном легкового автомобиля) возникают большие сдвигающие напряжения в верхнем слое покрытия автомобильной дороги. Внешние силы вызывают внутренние напряжения

в слое и повышение температуры, которые практически полностью поглощаются верхним слоем и не передаются на нижние слои дорожной одежды и земляного полотна, как нами было отмечено ранее (рис. 1) [3].

Рабочая гипотеза исследования заключается в том, что энергия внешних сил передается в слой покрытия. Причем в тех случаях, когда прочность сцепления между отдельными элементами (внутренние силы) превосходит внешние силы, вся энергия от движущегося автомобиля расходуется на нагрев слоя (повышение температуры). В тех случаях, когда внешние силы превышают внутренние силы, в слое начинаются перемещения отдельных структурных элементов. Энергия внешних сил расходуется на перемещение отдельных элементов и сопровождается переходом тепловой в потенциальную энергию, направленную на разрыв слоя (сопровождается снижением температуры покрытия).

Скорость движения легковых автомобилей значительно выше, чем у грузовых, количество легковых автомобилей значительно больше, чем грузовых. В результате чего интенсивность движения их значительно превосходит интенсивность движения грузовых автомобилей. Сдвигающие усилия верхнего слоя износа накапливаются и не успевают релаксировать. Постепенно происходит накопление внутренних напряжений, затем смещение отдельных структурных элементов в слое покрытия. При этом скорость разрушения связей между отдельными структурными элементами значительно превосходит скорость тиксотропного восстановления разрушенных связей внутри слоя. Следствием этого взаимодействия является, отрыв отдельных структурных элементов из слоя и постепенное уменьшение толщины слоя (износ).

Работу, которую производит автотранспорт над покрытием автомобильной дороги, можно разделить на две составляющих: вертикальную (упругий прогиб) и горизонтальную (сдвиговые деформации) [4]:

$$A = A_{\tau} + A_n, \quad (1)$$

где A_{τ} – работа, выполняемая горизонтальными силами над дорожным покрытием; A_n – работа, выполняемая вертикальными силами.

Часть энергии, которая передаётся дорожному покрытию от автомобиля, расходуется на нагрев (внутреннее сопротивление сдвигу), она частично рассеивается, а часть идёт на упругие деформации покрытия сопровождающаяся снижением температуры слоя.

Чтобы более наглядно оценить изменение внутренней энергии асфальтобетонного покрытия на скоростной автомагистрали, мы рекомендуем использовать тепловизор.

При выполнении данных экспериментов был задействован тепловизор Fluke Ti27. Основные преимущества этого тепловизора заключаются в том, что имеется: радиометрическая система визуализации; высокая точность измерений; неохлаждаемый датчик; точное измерение температур по всему полю изображения; частота обновления изображения 50 Гц; коррекция по окружающей температуре; влагозащищённый; работает при температурах не ниже -20°C .

На термограмме рис. 2 представлен случай, когда энергия, которая передаётся от автомобиля, идёт на нагрев дорожного покрытия. Тепловое поле распространяется вокруг автомобиля на соседние полосы. Наличие зоны возрастания температуры, после проезда автомобиля, свидетельствует о нарастании внутренних напряжений, направленных на противодействие колебаниям [2].

Таблица 1

Значение температур в полосе наката по термограмме рис. 2

Точка №	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4
$^{\circ}\text{C}$	25,9	26,1	26,3	27,7

Температура воздуха на момент обследования составляла $+16,0^{\circ}\text{C}$, а температура покрытия примерно $+27,5^{\circ}\text{C}$.

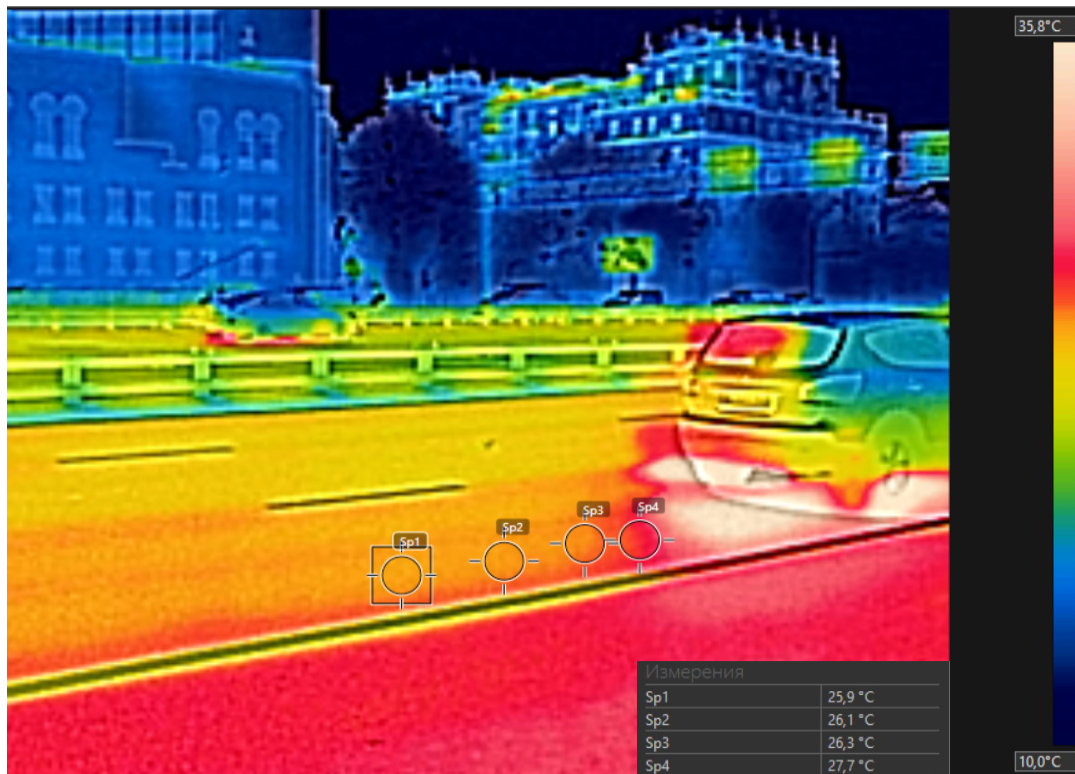


Рис. 2. Термограмма распределения температур от проезда автомобиля на локальном участке №1 при $T_{возд} = +16,0^{\circ}\text{C}$

Энергия, передающаяся от колёс автомобиля (внешние силы), идет на увеличение внутренних напряжений, в тех случаях, когда упругие деформации отсутствуют, происходит повышение температуры (нагрев). В результате чего происходит нагрев верхнего слоя покрытия, которое мы видим на термограмме.

При взаимодействии колёс легкового автомобиля происходит именно экзотермическая реакция (сопровождающаяся выделением теплоты) [1] и повышение температуры покрытия.

Это свидетельствует о высоком качестве покрытия и высокой прочности связей между отдельными элементами. Разница температуры составляет примерно $1,8^{\circ}\text{C}$ ($Sp1 = 25,9^{\circ}\text{C}$, $Sp4 = 27,7^{\circ}\text{C}$). Зону температур выхлопных газов в данном исследовании не учитываем.

В тех случаях, когда интенсивность воздействия внешних сил превосходит прочность сцепления между отдельными элементами (внутренними силами) на термограммах (рис. 3 и 4) отмечено снижение

температуры под колёсами автомобиля. На покрытие под колёсами автомобиля (рис. 3) температура значительно ниже (жёлтая зона) $+19,8^{\circ}\text{C}$, чем в периферийной зоне. Максимальная температура установлена под ведущим колесом $+27,8^{\circ}\text{C}$. Температура на поверхности за короткий промежуток времени снижается (за сотые доли секунды). Горячая зона под колесами охлаждается за достаточно маленький промежуток времени (на расстоянии до 1 метра). Затем отмечен постепенный разогрев дорожного покрытия за счёт внутренней энергии слоя. Температура с течением времени распределяется по слою равномерно во всех направлениях, захватывая смежные полосы движения.

Износ на многополосных магистралях значительно отличается от износа на двухполосных дорогах. Существенное отличие заключается в том, что при проезде по смежным полосам напряжения передаются на соседние полосы, в результате чего увеличиваются в несколько раз. Это приводит к ускоренному износу покрытий на многополосных магистралях, несмотря на то, что используются высококачественные материалы и технологии при устройстве верхнего слоя покрытия.

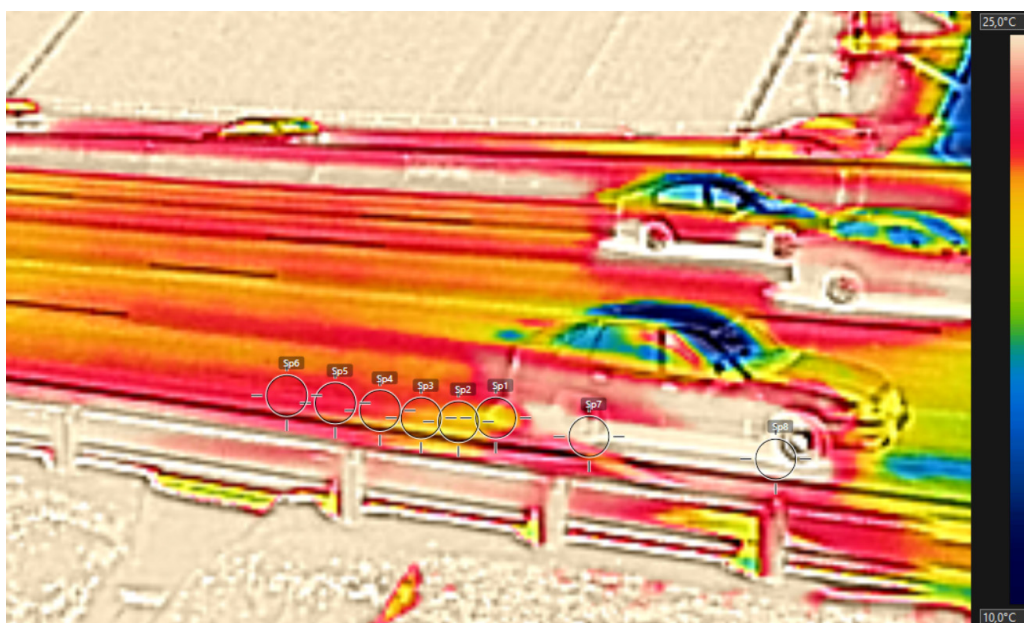


Рис. 3. Термограмма распределения температур от проезда автомобиля на локальном участке №2 при $T_{возд} = +16,0^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Значение температур в полосе наката по термограмме рис. 3

Точка №	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp7	Sp8
°C	19,8	20,7	21,2	21,9	22,3	22,3	25,9	27,8

Как видно из рис. 3 разница температур между температурами воздуха и на поверхности покрытия доходит до $+2,5^{\circ}\text{C}$. Под колесом температура $+19,8^{\circ}\text{C}$, а на расстоянии 4–5 м $+22,3^{\circ}\text{C}$, т.е. под колесом самая холодная зона. Это свидетельствует о том, что в местах концентрации внутренних напряжений (на термограммах это участок с минимальными температурами), энергия, передающаяся дорожному покрытию от автомобиля, затрачивается на сдвиговые, упругие деформации и внутренние колебания. Если внешние силы превосходят по величине внутренние силы, то происходят сдвиговые деформации, и возможен отрыв частиц.

На термограмме (рис. 4) зафиксирован момент отрыва зерна. В процессе съемки сделано больше 100 фотографий, и на всех снимках в данной зоне происходит локальное снижение температуры в узкой зоне, т.е. происходит местный интенсивный износ.

На небольшом участке заметна большая разница температур $\Delta = 4,4^{\circ}\text{C}$ (точка P0 с температурой $-16,0^{\circ}\text{C}$ и точка P3 с температурой $-20,4^{\circ}\text{C}$). Что на наш взгляд свидетельствует об отрыве отдельных частиц из слоя покрытия. При визуальном осмотре участка в этой зоне заметна колея, глубиной до 40 мм.

Таблица 3

Значение температур в полосе наката по термограмме рис. 4

Точка №	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
°C	-16,0	-17,1	-19,3	-20,4	-18,9	-16,9	-18,0	-17,8

Основными причинами повышенного износа на скоростных автомобильных дорогах являются: интенсивности, высокие скорости движения, а также использование шипованной резины в зимнее время года.

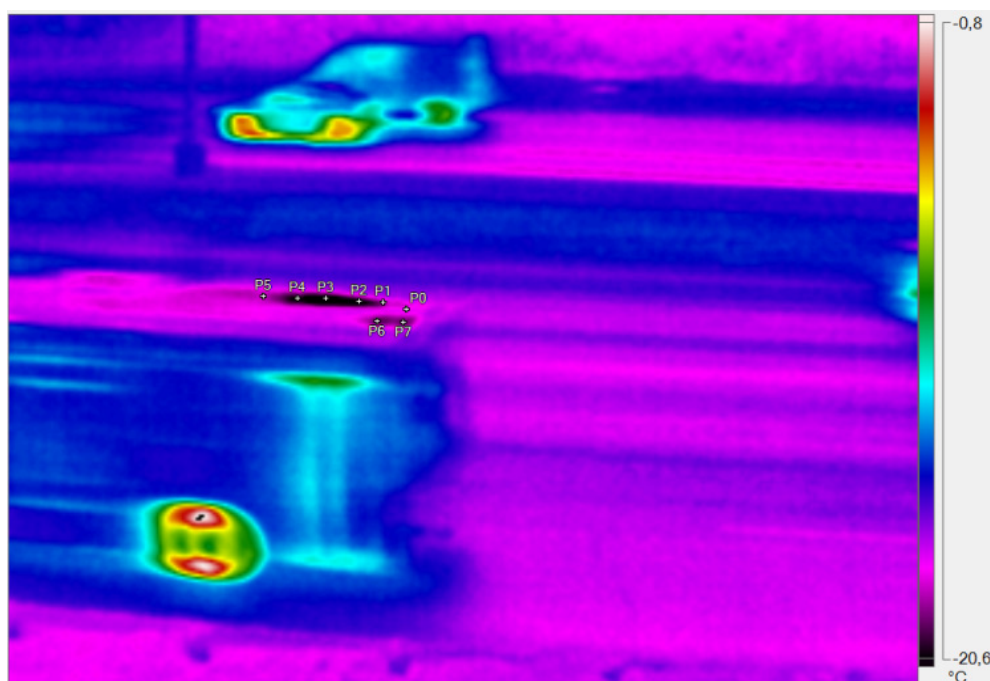


Рис. 4. Термограмма распределения температур на локальном участке при $T_{\text{возд}} = -13^{\circ}\text{C}$

На скорость износа также оказывает значительное влияние технологические особенности процесса строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [6, 7], которые обеспечивают прочность и однородность связей между структурными элементами в слое покрытия.

Заключение

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Износ резко возрастает при скорости движения более 90 км/ч и достигает максимума при скорости 140 км/ч. Эти скорости повсеместно встречаются на левой полосе движения, особенно в моменты перестроения из ряда в ряд.
2. Установлено, что на качественном покрытии деформации сдвига практически отсутствуют. Под колесом автомобиля происходит повышение температуры на 2...7 $^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует об отсутствии сдвигов в верхнем слое в сухую погоду.
3. Тепловизор может быть использован для фиксации термодинамического состояния покрытия и позволяет зафиксировать период и интенсивность износа верхнего слоя.

4. На участках дороги, где отмечено снижение температуры под колесом движущегося автомобиля, что соответствует началу износа, необходимо провести экстренные мероприятия, препятствующие износу, например, гидрофобизацию слоя путем пропитки, или устроить тонкий слой износа (без фрезерования существующего слоя), не дожидаясь образования колеи.

Список литературы

1. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электричество и магнетизм: учебное пособие / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – Минск: БРУИР, 2006. – 232 с.
2. Ларина, Т.А. Высокий износ / Т.А. Ларина // Автомобильные дороги. – 2013. – № 12 (985). – С. 65–67.
3. Ларина, Т.А. Модель износа асфальтобетонных покрытий при эксплуатации дорог / Т.А. Ларина, Н.Р. Зубарев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 2.
4. Кириллов, А.М. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство / А.М. Кириллов, М.А. Завьялов // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 5 (57). – С. 34–44.
5. Козлов, В.А. Моделирование разрушения асфальтобетонного покрытия от динамического воздействия воды / В.А. Козлов, А.И. Котов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 3 (47). – С. 52–59.
6. Строительство автомобильных дорог: учебник / В.В. Ушаков [и др.]; под ред. В.В. Ушакова и В.М. Ольховикова. – М.: КНОРУС, 2016. – Гл. 19. – С. 266–300.
7. Ушаков, В.В. Рекомендации по устройству асфальтобетонных покрытий при пониженной температуре воздуха / В.В. Ушаков, В.А. Ярмолинский, Т.А. Ларина // Транспортное строительство. – 2018. – № 6. – С. 14–17.

References

1. Tashlykova-Bushkevich I.I. *Fizika. Mehanika. Molekuljarnaja fizika. Termodinamika. Jelektrichestvo i magnetizm* (Physics. Mechanics. Molecular physics. Thermodynamics. Electricity and magnetism), Minsk, BRUIR, 2006, 232 p.
2. Larina T.A. *Avtomobil'nye dorogi*, 2013, no. 12 (985), pp. 65–67.
3. Larina T.A., Zubarev N.R. *Nauka i tehnik v dorozhnoj otrasli*, 2019, no. 2.
4. Kirillov A.M., Zav'jalov M.A. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2015, no. 5 (57), pp. 34–44.
5. Kozlov V.A., Kotov A.I. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*, 2017, no. 3 (47), pp. 52–59.
6. Ushakov V.V., Ol'hovikov V.M., Nosov V.P., Silkin V.V., Rudakova V.V., Lupanov A.P., Gorjachev M.G., Larina T.A., Vasil'ev A.P., Apestin V.K., Jakovlev Ju.M. *Stroitel'stvo avtomobil'nyh dorog* (Road construction), Moscow, KNORUS, 2016, pp. 266–300.
7. Ushakov V.V., Jarmolinskij V.A., Larina T.A. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2018, no. 6, pp. 14–17.