

Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации

Николай Игоревич Шестаков¹, Наталья Владимировна Хохлова²,
Юрий Эммануилович Васильев³, Ульяна Олеговна Менкина³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Московский автомобильно-дорожный колледж им. А.А. Николаева; г. Москва, Россия;

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Нефтяной дорожный битум является основным компонентом дорожных покрытий, которые играют важную роль в обеспечении безопасности и комфорта движения транспортных средств. Со временем битум подвергается старению, что приводит к изменению его физических и химических свойств. Такие изменения вызывают снижение качества дорожных покрытий, ухудшение их эксплуатационных характеристик и уменьшение долговечности. Проведен анализ исследований в области термостабилизации битума, что имеет большое значение для оптимизации технологических процессов при высоких температурах. Определен оптимальный состав модифицированных битумов с применением стеариновой кислоты, индустриального масла.

Материалы и методы. Термическая устойчивость битума — важное условие для сохранения его качества на всех этапах жизненного цикла. Рассматривается вопрос термостабилизации битума с использованием стеариновой кислоты Т-18 в комплексе с индустриальным маслом И-20, которые приводят к повышению устойчивости от воздействия внешних факторов. Для установления степени влияния модифицирующих компонентов на свойства битума выполнен двухфакторный ротаторный эксперимент с варьированием количества добавок индустриального масла и стеариновой кислоты.

Результаты. Исследованы составы и свойства полученных модифицированных битумов. Анализ полученных результатов показывает, что воздействие стеариновой кислоты на пенетрацию битума примерно в 6 раз выше, чем воздействие индустриального масла, в то время как оба компонента совместно оказывают незначительное влияние на другие исследуемые свойства битума.

Выводы. Для дальнейшего изучения термической устойчивости на оптимальных вариантах битумных композиций выполнены исследования по сохранению массы пленок битума при температурах от 160 до 220 °С. По полученным результатам определено, что эффективность стеариновой кислоты проявляется при повышенных температурах и достигает значений до 25 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битум, термостабилизация, стеариновая кислота, индустриальное масло, потеря массы, старение битума

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Васильев Ю.Э., Менкина У.О. Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1926–1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936

Автор, ответственный за переписку: Наталья Владимировна Хохлова, Natalyahoh@bk.ru.

Changes in the structure and properties of road bitumen during its thermal stabilization

Nikolay I. Shestakov¹, Natalia V. Khokhlova², Yuri E. Vasiliev³, Uliana O. Menkina³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Moscow Automobile and Road College named after A.A. Nikolaev; Moscow, Russian Federation;

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Petroleum bitumen is the main component of road surfaces, which play an important role in ensuring the safety and comfort of vehicle traffic. Over time, bitumen undergoes ageing, which leads to changes in its physical and chemical properties. Such changes cause a decrease in the quality of road surfaces, deterioration of their performance characteristics and reduction of durability. The analysis of research in the field of bitumen thermal stabilization, which is of great importance

for optimization of technological processes at high temperatures, was carried out. The optimal composition of modified bitumen using stearic acid, industrial oil was determined.

Materials and methods. Bitumen undergoes serious changes during technological processes, during the transition from the bulk to the film state under the influence of high temperatures. Thus, thermal stability of bitumen is an important condition for preserving its quality at all stages of its life cycle. The issue of bitumen thermal stabilization with the use of stearic acid T-18 in combination with industrial oil I-20, which lead to increased resistance from external factors, is considered. To establish the degree of influence of modifying components on bitumen properties, a two-factor rotatable experiment with varying the amount of industrial oil and stearic acid additives, was performed.

Results. The compositions and properties of the obtained modified bitumen were studied. The analysis of the obtained results shows that the effect of stearic acid on bitumen penetration is about 6 times higher than the effect of industrial oil, while both components together have insignificant effect on the other studied properties of bitumen.

Conclusions. In order to further study thermal stability on the optimal versions of bitumen compositions, studies on mass retention of bitumen films at temperatures from 160 to 220 °C were performed. According to the obtained results, it was found that the effectiveness of stearic acid is manifested at higher temperatures and reaches values up to 25 %.

KEYWORDS: bitumen, thermal stabilization, stearic acid, industrial oil, weight loss, bitumen ageing

FOR CITATION: Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Vasiliev Yu.E., Menkina U.O. Changes in the structure and properties of road bitumen during its thermal stabilization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1926-1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936 (rus.).

Corresponding author: Natalia V. Khokhlova, Natalyahoh@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Нефтяной битум — один из наиболее широко востребованных материалов в дорожном строительстве. Являясь органическим вяжущим веществом, дорожный битум подвержен изменению физических, химических и, как следствие, эксплуатационных свойств при высоких температурах, что приводит к деформациям и разрушению дорожного покрытия. Для того чтобы предотвратить такие негативные последствия используются технологии термостабилизации этого материала.

Процесс изменения битума под воздействием высокой температуры — сложный и многопараметрический процесс, который происходит на молекулярном уровне. При нагревании битума его молекулы начинают быстро изменяться [1, 2], что приводит и к изменению его физико-химических свойств.

Одним из основных процессов, происходящих при изменении битума под воздействием высокой температуры, является окисление. При этом происходит реакция между молекулами битума и кислородом из воздуха, что вызывает образование окисных продуктов и изменение химического и группового состава битума [3]. Как правило, это влечет за собой потерю пластичности и снижение его адгезии к другим материалам, что прямо ведет к старению продукта. Кроме того, при высоких температурах происходит деградация высокомолекулярных компонентов битума, что также может привести к потере его свойств [4]. В результате этого процесса битум может стать более жестким и хрупким, что провоцирует его деформацию и разрушение.

Термостабилизация дорожного битума направлена на увеличение термической стойкости органического вяжущего, в основе процесса лежит добавление в битум модификаторов, которые позволяют ему сохранять физические свойства при воздействии высоких температур в технологических процессах [5, 6].

Для обеспечения термостабильности дорожного битума используются различные добавки, такие как полимеры, адсорбенты или антиоксиданты. Полимеры формируют трехмерную сеть, обладающую высокой термостойкостью, что способствует сохранению формы и прочности дорожного покрытия в процессе эксплуатации [7–9]. Адсорбенты интегрируются в структуру битума и снижают его чувствительность к температурным изменениям, антиоксиданты защищают битум от окисления.

Применение полимеров в битумных смесях для дорожных покрытий было исследовано во многих научных статьях. Например, в работе [10] рассматриваются различные типы полимеров и их влияние на термическую стабильность битума. В другой публикации [11] авторы исследовали эффективность использования полимеров на основе стирола и бутадиена для улучшения термической стабильности битума.

Адсорбенты также служат важными добавками для обеспечения термостабильности битума. Командой ученых изучены различные типы адсорбентов и их влияние на термическую стабильность битума [12]. Авторы обнаружили, что использование адсорбентов на основе глины и кремнезема может значительно повысить термическую стабильность нефтяного битума.

Антиоксиданты также играют значительную роль в обеспечении термостабильности битума. В научных работах [13, 14] анализируются типы антиоксидантов и их влияние на защиту битума от окисления. Указывается, что применение антиоксидантов на основе фенолов и аминофенолов может улучшить защиту битума от окисления. Установлена эффективность применения в качестве термостабилизирующих модификаторов добавок на основе сульфонов и фосфонов [15].

Таким образом, использование различных добавок является эффективным способом обеспечения термостабильности дорожного битума. Исследова-

ния, проведенные в научных статьях, подтверждают эффективность добавок как минерального, так и органического происхождения и с разной степенью влияния. Развитие этого направления позволяет решить не только технологические вопросы, но и экологические, что актуально для строительной отрасли.

Цель исследования — определение оптимального состава модифицированных битумов с применением стеариновой кислоты в качестве термостабилизирующей добавки, индустриального масла в виде пластификатора, а также установление эффективности при температурах, соответствующих технологическим процессам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данного исследования объектом изучения выбран битум БНД 70/100, соответствующий требованиям ГОСТ 33133–2014, производства АО «Газпромнефть-Московский НПЗ», представлен в табл. 1.

Стеариновая кислота Т-18 — тонкодисперсный порошкообразный материал, поэтому для сни-

жения степени ее сегрегации в битуме необходимо применение жидкого пластификатора. В качестве пластификатора использовалось индустриальное масло И-20. Основные физико-химические показатели стеариновой кислоты Т-18 и индустриального масла И-20 представлены в табл. 2, 3.

Для установления степени воздействия модифицирующих компонентов на свойства битума был выполнен двухфакторный ротатбельный эксперимент.

Определение свойств битума проводилось согласно требованиям ГОСТ 33140–2014. Установление величины пенетрации исследуемых составов битумных композиций при температуре 25 °С проводилось в соответствии с ГОСТ 33136–2014 на автоматическом пенетрометре «Линтел ПН–10Б». Температура размягчения определялась по методике, установленной в ГОСТ 33142–2014, на аппарате «Линтел КИШ–20М4». На цифровом дуктилометре Infratest 1500 мм устанавливали растяжимость битума при температуре 0 °С согласно ГОСТ 33138–2014. Оценка динамической вязкости при температурах 135 и 165 °С проводилась с использова-

Табл. 1. Основные физико-химические показатели БНД 70/100

Table 1. Main physical and chemical parameters of BND 70/100

Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	Растяжимость при 0 °С, см Extensibility, at 0 °C, cm	Температура хрупкости, °С Brittleness temperature, °C	Температура вспышки, °С Flash point, °C
98	44,0	5,03	–20	280

Табл. 2. Основные физико-химические показатели стеариновой кислоты Т-18

Table 2. Main physical and chemical parameters of stearic acid T-18

Показатели / Indicators	Значения / Values
Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	940
Молекулярная масса, г/моль / Molecular weight, g/mol	284,48
Массовая доля неомыляемых веществ, % / Mass fraction of unsaponifiable substances, %	0,5
Кислотное число, мг КОН/г / Acid number, mg KOH/g	192–210
Число омыления, мг КОН/г / Saponification number, mg KOH/g	194–213
Температура самовоспламенения, °С / Self-ignition temperature, °C	395
Температура кипения с разложением, °С / Boiling point with decomposition, °C	376

Табл. 3. Основные физико-химические показатели индустриального масла И-20

Table 3. Main physical and chemical parameters of industrial oil I-20

Показатели / Indicators	Значения / Values
Плотность при температуре 20 °С, кг/м³ / Density at a temperature of 20 °C, kg/m³	890
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм²/с / Kinematic viscosity at 40 °C, mm²/s	29–35
Кислотное число, мг КОН/г / Acid number, mg KOH/g	0,03
Зольность, % / Ash content, %	0,005
Температура вспышки в открытом тигле, °С / Flash point in an open crucible, °C	200

нием ротационного вискозиметра Brookfield, модель DV-II+Pro согласно ГОСТ 33137–2014. В ходе эксперимента были получены данные о вязкости, сП/мП·с, температуре, °С, скорости сдвига/напряжении, % крутящего момента, шпинделе/скорости и состоянии программы шага. Точность измерений составила $\pm 1,0$ %. Параметры старения определяли по методу RTFOT по ГОСТ 33140–2014, суть которого в имитации старения вяжущего при приготовлении и укладке асфальтобетонной смеси. Время проведения испытания — 8 ч.

Планирование двухфакторного ротатбельного эксперимента проводилось в программном комплексе (ПК) Gradient. Обработка полученных результатов и их графическая интерпретация выполнены в ПК STATISTICA version 10. Составы исследуемых органических вяжущих и их физико-механические характеристики приведены в табл. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве комплексных модификаторов битума отдельный интерес представляют жирные кислоты. Например, известно, что линолевая кислота $C_{18}H_{32}O_2$ и линоленовая кислота $C_{18}H_{30}O_2$ регулируют стабильность битума как при высоких, так и при низких температурах. Вместе с тем воздействие стеариновой кислоты на битум изучено менее подробно, хотя представляет высокую потенциальную эффективность за счет своих свойств.

Стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$ — это одноосновная карбоновая кислота алифатического ряда, имеющая при комнатной температуре вид бесцветных кристаллов, хорошо растворимых в диэтиловом эфире и нерастворимых в воде. Стеариновая кислота является насыщенной жирной кислотой и широко используется в промышленности в качестве эффективного модифицирующего компонента для органических материалов, улучшая такие свойства полимерных материалов, как механическая прочность, устойчивость к воздействию внешних факторов и температурную стойкость.

Доказана эффективность применения стеариновой кислоты для различных полимерных материалов: исследование [16] показало, что добавление стеариновой кислоты в полиэтилен повышает его механическую прочность и устойчивость к воз-

действию ультрафиолетового излучения. Это объясняется тем, что стеариновая кислота образует стабильные комплексы с полимерными цепями, что повышает их прочность и устойчивость.

Кроме того, стеариновая кислота может использоваться для улучшения свойств других полимерных материалов, таких как полиамиды [17] и полистирол [18]. В каждом случае добавление стеариновой кислоты приводит к повышению механической прочности и устойчивости к воздействию внешних факторов.

Для установления верхней границы варьирования количества добавок индустриального масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 посредством планирования эксперимента был составлен двухфакторный ротатбельный эксперимент. Планирование двухфакторного ротатбельного эксперимента служит эффективным инструментом в исследовании влияния двух различных факторов (концентрация индустриального масла и стеариновой кислоты) на свойства модифицированного битума. В таком эксперименте каждый из факторов имеет два уровня, и цель эксперимента состоит в том, чтобы определить не только как каждый фактор влияет на исследуемый процесс, но и как они взаимодействуют друг с другом.

В качестве факторов выбраны: X_1 — количество индустриального масла И-20 по отношению к массе битума; X_2 — количество стеариновой кислоты Т-18 по отношению к массе битума. Основные уровни факторов X_1 и X_2 — 3 и 0,3, шаг варьирования — 1 и 0,1 соответственно. В качестве функции отклика рассматривается изменение температуры размягчения, растяжимость, динамическая вязкость при 135 и 165 °С, пенетрация полученных составов битума, а также после старения под воздействием высокой температуры и воздуха.

По результатам проведенных экспериментальных исследований с помощью ПК Gradient и STATISTICA version 10 составлены математические модели, которые отражают влияние двух различных компонентов на характер изменения определяемых функций отклика.

В табл. 5 представлены коэффициенты полученных моделей.

Графическая интерпретация полученных поверхностей отклика для различных свойств битума приведена на рис. 1–5.

Табл. 4. Составы и свойства модифицированных битумов

Table 4. Compositions and properties of modified bitumen

Содержание добавок, % от массы битума Additives content, % of bitumen weight	Составы / Compositions									
	К	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Индустриальное масло И-20 Industrial oil I-20	—	1	5	1	5	0,172	5,83	3	3	3
Стеариновая кислота Т-18 Stearic acid T-18	—	0,1	0,1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,172	0,583	0,3

Содержание добавок, % от массы битума Additives content, % of bitumen weight	Составы / Compositions									
	К	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Выходные параметры / Output parameters</i>										
Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	98	123	192	133	199	109	227	147	173	170
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	44	42	41,3	44,5	36,5	42	36,3	40,4	39,5	40
Растяжимость, при 0 °С, см Extensibility, at 0 °C, cm	5,03	5,96	7,48	12,05	10,25	5,7	12,5	7,64	9,11	9,3
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,29	0,315	0,24	0,31	0,25	0,342	0,21	0,24	0,255	0,26
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,025	0,087	0,075	0,1	0,08	0,105	0,065	0,08	0,075	0,076
<i>Вяжущее, состаренное по методу RTFOT / Astringent aged by the RTFOT method</i>										
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	48,8	47,6	45	48	43,4	49,2	44,4	45,4	43,6	47,1
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,545	0,505	0,49	0,34	0,34	0,525	0,305	0,435	0,4	0,425
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,145	0,13	0,135	0,095	0,105	0,145	0,085	0,12	0,105	0,115

Табл. 5. Таблица коэффициентов математических моделей для определяемых свойств

Table 5. Table of coefficients of mathematical models for defined properties

Номер опыта Experience number	B_0 / v_0	B_1 / v_1	B_2 / v_2	B_{11} / v_{11}	B_{12} / v_{12}	B_{22} / v_{22}
Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	170,0000	37,3810	6,7212	-1,1875	-0,0750	-5,6875
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	40,0000	-2,0951	-0,4466	-0,0438	-1,8250	0,3563
Растяжимость при 0 °С, см / Extensibility, at 0 °C, cm	9,300	1,1671	1,3674	-0,0506	-0,8300	-0,4131
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,2600	-0,0402	0,0033	0,0038	0,0033	-0,0020
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,0760	-0,0011	0,0014	0,0056	-0,0020	0,0018
<i>Вяжущее, состаренное по методу RTFOT / Astringent aged by the RTFOT method</i>						
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	47,1000	-1,7485	-0,4685	-0,0625	-0,5000	-1,1225
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,4250	-0,0408	-0,0456	-0,0044	0,0038	-0,0031
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,0115	-0,0087	-0,0108	0,0006	0,0013	-0,0006

Примечание: v_0 — свободный член, равный отклику системы на начальной стадии эксперимента; v_1 и v_2 — коэффициенты регрессии, показывающие степень влияния концентраций индустриального масла и стеариновой кислоты соответственно на выходные параметры отклика; v_{12} — коэффициент, указывающий на наличие эффекта взаимодействия двух модифицирующих компонентов (парного взаимодействия); v_{11} и v_{22} — коэффициенты, характеризующие долю изменчивости зависимой переменной относительно среднего для индустриального масла и стеариновой кислоты соответственно.

Note: v_1 — free term equal to the response of the system at the initial stage of the experiment; v_1 and v_2 — regression coefficients, showing the degree of influence of concentrations of industrial oil and stearic acid, respectively, on the output response parameters; v_{12} — coefficient indicating the presence of interaction effect of two modifying components (pairwise interaction); v_{11} and v_{22} — coefficients characterizing the share of variability of the dependent variable relative to the average for industrial oil and stearic acid, respectively.

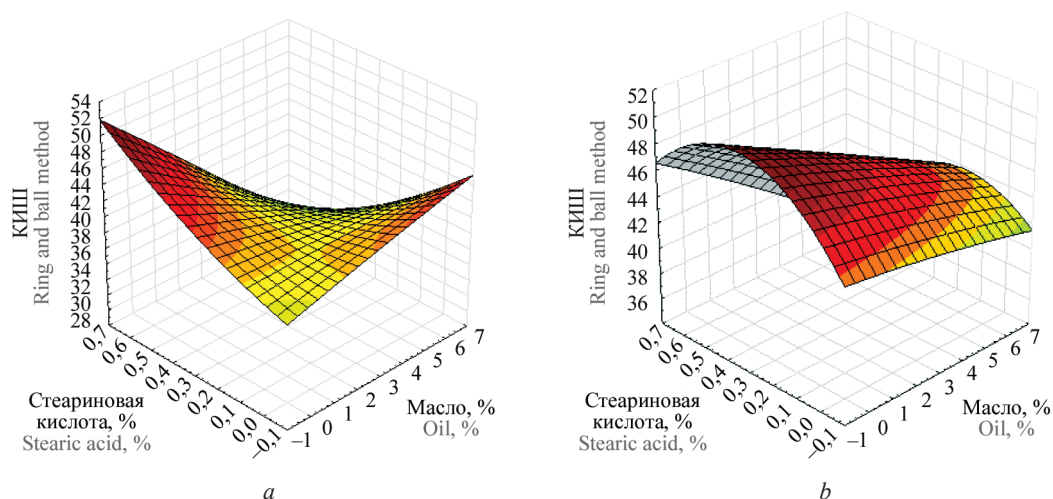


Рис. 1. Температуры размягчения до (a) и после (b) старения

Fig. 1. Softening temperatures before (a) and after (b) ageing

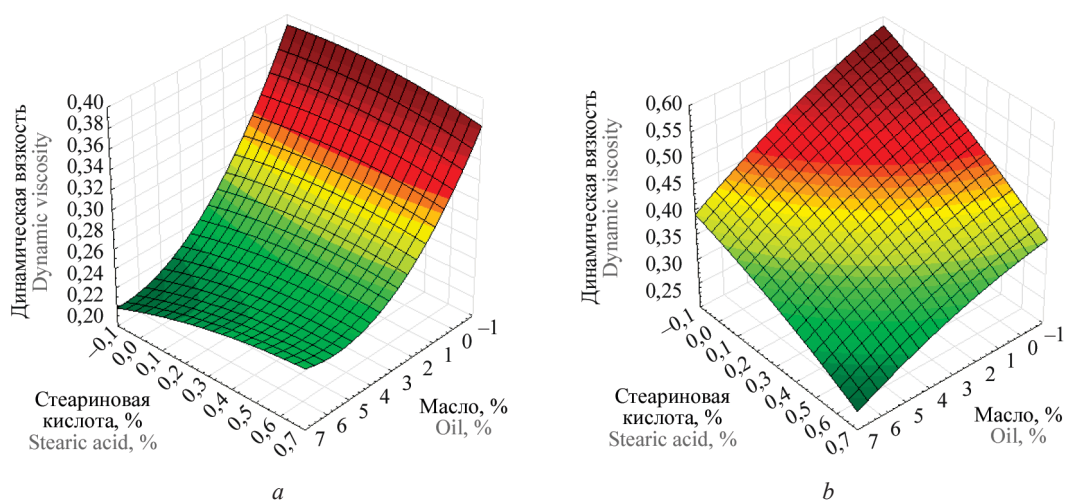


Рис. 2. Динамическая вязкость при 135 °C до (a) и после (b) старения

Fig. 2. Dynamic viscosity at 135 °C before (a) and after (b) ageing

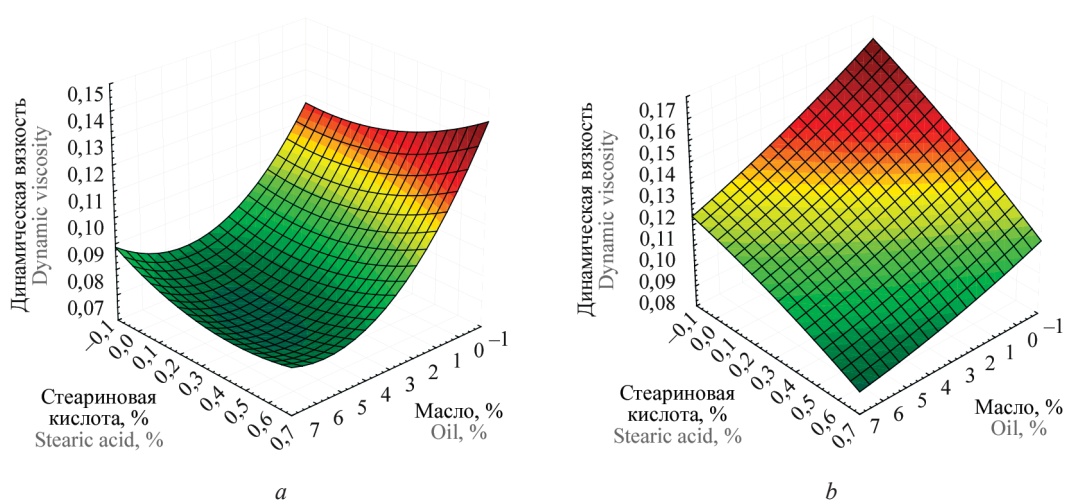


Рис. 3. Динамическая вязкость при 165 °C до (a) и после (b) старения

Fig. 3. Dynamic viscosity at 165 °C before (a) and after (b) ageing

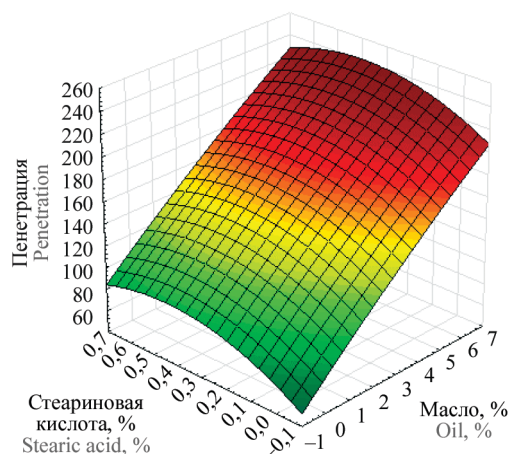


Рис. 4. Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм

Fig. 4. The depth of penetration of the needle at 25 °C, 0.1 mm

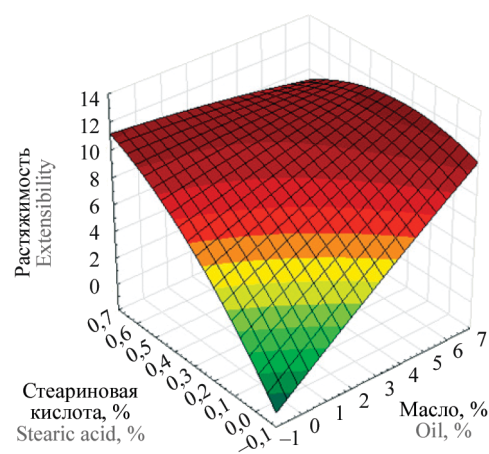


Рис. 5. Растяжимость при 0 °С, см

Fig. 5. Extensibility at 0 °C, cm

Наибольший интерес представляют результаты согласно полученным коэффициентам для пенетрации битума. Коэффициенты v_1 и v_2 имеют положительное значение, причем воздействие стеариновой кислоты на пенетрацию битума примерно в 6 раз выше, чем воздействие индустриального масла. В целом такая картина объективно вписывается в общую тенденцию пластификации битума индустриальным маслом. Вместе с тем при совместном воздействии двух добавок наблюдается уменьшение пенетрации, что можно объяснить активным взаимодействием добавок и структурирующими свойствами в комплексе.

Аналогичная динамика наблюдается и для дуктильности битумных композиций, которая характеризует пластичность битума. Отдельное влияние компонентов ведет к увеличению растяжимости, а совместное действие оказывает противоположный характер. Наблюдаемый эффект коррелирует с эффектом по пенетрации и объясняется общим изменением структуры битума при комплексном воздействии добавок.

Анализ остальных полученных результатов (динамическая вязкость, температура размягчения) показывает, что оба компонента оказывают незначительное влияние на исследуемые свойства битума как по отдельности, так и при комплексном взаимодействии. Это подтверждается малыми численными значениями коэффициентов в уравнениях регрессии. Однако в большинстве случаев коэффициенты, отражающие взаимное влияние, имеют отрицательное значение, что отображает изменения характера воздействия в зависимости от концентрации добавок. Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что изменение содержания индустриального масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 в битуме изменяет основные свойства битума несущественно.

Стеариновая кислота Т-18 является одной из наиболее эффективных термостабилизирующих

добавок для битума [19–21] за счет содержания карбоксильных радикалов. Она обладает высокой термостойкостью и способна защитить битум от деформации и разрушения при высоких температурах.

Переход битума из объемного в пленочное состояние происходит в технологических процессах производства, когда он подвергается термическому воздействию при высоких температурах. В этом случае битум начинает расплавляться и превращаться в пленку, которая покрывает поверхность материала и обеспечивает ему необходимые вяжущие и эксплуатационные свойства. Важно отметить, что качество перехода битума из объемного в пленочное состояние зависит от многих факторов, таких как температура, время воздействия, состав, структура материала и др. Поэтому производители битумных материалов уделяют особое внимание этому процессу и разрабатывают специальные технологии и рецептуры, которые позволяют обеспечить оптимальный переход битума из объемного в пленочное состояние и повысить долговечность и надежность готовых материалов.

Данное утверждение основывается на результате исследований, которые показали, что битум в объемном состоянии имеет более высокую термостабильность и устойчивость к деформации при высоких температурах, чем в тонких пленках. Это связано с тем, что в объемном состоянии битум обладает более высокой массой и толщиной, что обеспечивает более эффективную защиту от воздействия внешних факторов. Важно отметить, что тонкие пленки битума также могут обладать высокой термостабильностью и защищать поверхности от деформации и разрушения при высоких температурах, если они содержат соответствующие добавки, такие как стеариновая кислота Т-18.

Температурная устойчивость битума определяется стандартными методами по ГОСТ 33140–2014 при моделировании производственных процессов,

происходящих с битумом в цикле асфальтобетонного завода. Температура данного метода регламентирована, и для нефтяных дорожных битумов составляет 163 °С. Тем не менее при производстве конкретных видов асфальтобетонов, таких как литые, температура процесса смешения возрастает до значений в диапазоне 190–220 °С. В связи с этим проблемы термостабилизации битума приобретают особую актуальность.

Для исследования поведения термостабилизированных битумных композиций проводили моделирование процессов при температурах выше, чем регламентировано ГОСТ 33140–2014. Сущность метода заключается в нанесении пленки битума на металлическую поверхность площадью 25 см² и выдерживании исследуемых образцов при температурах от 160 до 220 °С с шагом 10 °С в течение 1 ч при каждой температуре.

Для установления степени влияния стеариновой кислоты и индустриального масла на термоста-

билизацию битума в качестве объектов сравнения выбраны композиции, составы которых указаны в табл. 6.

После часовой экспозиции на каждом этапе температур определялась потеря массы исследуемых составов. Полученные результаты представлены на рис. 6.

По полученным результатам установлено, что композиция К2 показывает максимальную потерю массы, что связано с термической деструкцией компонентов добавленного масла-пластификатора. Композиция К3, состоящая из индустриального масла в количестве 3 %, битума и стеариновой кислоты, продемонстрировала результаты, сопоставимые с чистым битумом К1. Если учесть количество добавленного индустриального масла в К3, то очевидно, что введение стеариновой кислоты сохраняет до 3 % общей массы битума при повышении температуры до 220 °С, что при перерасчете на потерю массы составляет 25,9 %.

Табл. 6. Составы битумных композиций для исследования динамики потери массы

Table 6. Compositions of bitumen compositions for the study of mass loss dynamics

Номер композиции Composition Number	Состав композиции Composition of the composition
К1	Контрольный бездобавочный образец битума БНД 70/100 Control additive-free specimen of bitumen BND 70/100
К2	Битум БНД 70/100 + 3 % (от массы битума) индустриального масла Bitumen BND 70/100 + 3 % (by weight of bitumen) of industrial oil
К3	Битум БНД 70/100 + 3 % (от массы битума) индустриального масла + 0,3 % стеариновой кислоты (от массы битума) Bitumen BND 70/100 + 3 % (by weight of bitumen) industrial oil + 0.3 % stearic acid (by weight of bitumen)

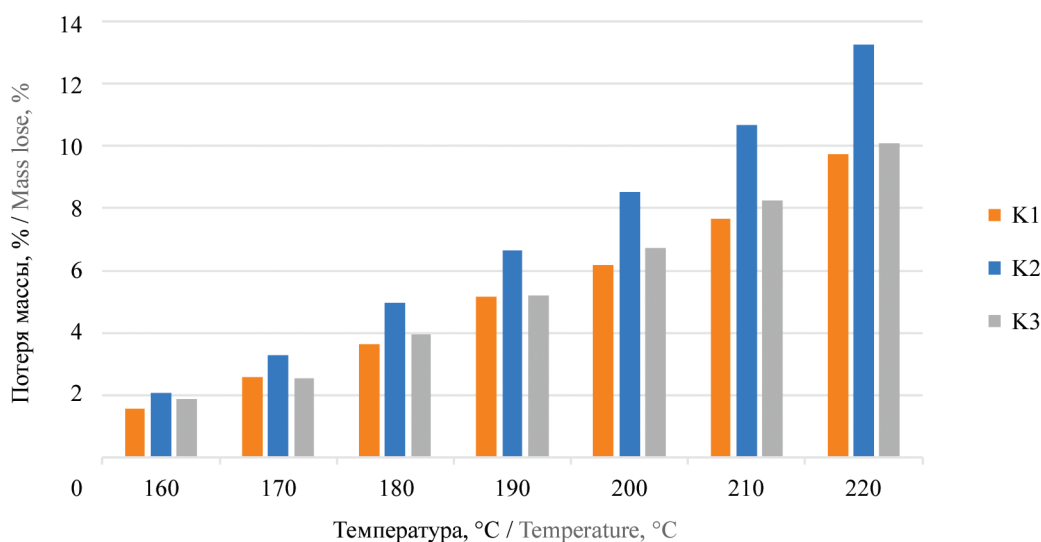


Рис. 6. Динамика потери массы битума в исследуемых составах битумных композиций

Fig. 6. Dynamics of bitumen mass loss in the studied bitumen compositions

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при введении стеариновой кислоты наблюдается повышение температурной устойчивости исследуемых битумов в диапазоне температур 160–220 °С. Функция индустриального масла заключается не столько в пластификации, сколько в возможности более эффективного распределения стеариновой кислоты в расплаве битума. Таким образом, при комплексном воздействии этих добавок происходит пластификация битума, которая подтверждается результатами исследования его пенетрации и дуктильности, и дополнительное

снижение потери массы битума при его нагревании до 220 °С.

В результате исследования было выявлено, что добавление промышленного масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 в дорожный битум не оказывает существенного влияния на его основные свойства, такие как динамическая вязкость и температура размягчения. Однако стеариновая кислота Т-18 является одной из наиболее эффективных термостабилизирующих добавок для битума, обладает высокой термической стабильностью и может эффективно защищать битум от деформации и разрушения при высоких температурах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова Л.М., Зайдуллин И.М., Аббакумова Н.А., Хуснутдинов И.Ш., Кашапова Р.Р. Информативность параметров состава и строения битумов для оценки их сопротивления старению // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 10. С. 131–134. EDN NXAIRD.
2. Печеный Б.Г., Курбатов В.Л., Лосев В.П. О механизме старения битумов и методах их испытания // Университетская наука. 2019. № 2 (8). С. 28–32. EDN NESZAL.
3. Okhotnikova E.S., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Romanov G.V., Frolov I.N. Express-method of determination of the content of resins and asphaltenes in bitumens by thermal analysis // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 24. Pp. 44758–44763. EDN WPDVMB.
4. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Механизм термического разложения асфальтенов природных битумов // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 12. С. 27–31. EDN UBLWFZ.
5. Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А., Афонин В.В., Архипова А.И. Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1358–1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371
6. Shekhovtsova S., Korolev E. Interfacial phenomena at the interface in the system “Carbon Primary Materials-Water Solutions of Surfactants” for cement materials // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 2. P. 556. DOI: 10.3390/ma15020556
7. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80
8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 77. Pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.011
9. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям // Автомобильные дороги. 2013. № 8. С. 50–60.
10. Bulatović V.O., Rek V., Marković K.J. Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen // Journal of Elastomers & Plastics. 2014. Vol. 46. Issue 5. Pp. 448–469. DOI: 10.1177/0095244312469964
11. Teltayev B., Amirbayev E., Radovskiy B. Evaluating the effect of polymer modification on the low-temperature rheological properties of asphalt binder // Polymers. 2022. Vol. 14. Issue 13. P. 2548. DOI: 10.3390/polym14132548
12. Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V. et al. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: The rosary-type structure // Energy & Fuels. 2007. Vol. 21. Issue 4. Pp. 2165–2175. DOI: 10.1021/ef070089v
13. Rossi C.O., Caputo P., Ashimova S., Fabozzi A., D’Errico G., Angelico R. Effects of Natural anti-oxidant agents on the bitumen aging process: An EPR and rheological investigation // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 8. P. 1405. DOI: 10.3390/app8081405
14. Зайдуллин И.М., Петрова Л.М., Якубов М.Р., Борисов Д.Н. Изменение состава асфальтенов при старении битума в присутствии антиоксидантов // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86. № 7. С. 1137–1142. EDN AYVSZL.
15. Ojum C., Kuna K., Thom N.H., Airey G.D. An investigation into the effects of accelerated curing on cold recycled bituminous mixes // Asphalt Pavements. 2014. Pp. 1177–1188. DOI: 10.1201/b17219-144
16. Shaban S.M. Effect of stearic acid on the mechanical properties and UV stability of LDPE // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 113. Issue 4. Pp. 2114–2122.
17. Kim S.K. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polyamide 6 //

Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 119. Issue 6. Pp. 3483–3490.

18. Lee K.S. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polystyrene // Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 120. Issue 5. Pp. 2705–2711.

19. Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Кудинов А.В., Нечаев А.Н., Дегтянников А.С. Получение нефтяных дорожных битумов с повышенной стойкостью против старения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 5 (83). С. 89–94. EDN NTOHRJ.

20. Опанасенко О.Н., Лукиш О.В., Жигалова О.Л., Крутько Н.П., Чернецкая В.М., Козинец Т.А. Влияние природы функциональных групп химических модификаторов на термическую стабильность нефтяного битума // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2015. № 1. С. 101–106. EDN TLCRLT.

21. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А., Королев Е.В. Критериальная оценка термодеструктивных процессов в асфальтобетоне на основе окисленных и остаточных битумов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5 (713). С. 58–70. EDN XZOIJN.

Поступила в редакцию 8 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 26 сентября 2023 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Николай Игоревич Шестаков** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; Nik.shestakov.1990@mail.ru, SHestakovNI@mgsu.ru;

Наталья Владимировна Хохлова — аспирант кафедры градостроительства, преподаватель специальных дисциплин; **Московский автомобильно-дорожный колледж им. А.А. Николаева;** 105082, г. Москва, Бакунинская, д. 81; SPIN- код: 4600-7174, ORCID: 0000-0003-4471-1827; Natalyahoh@bk.ru;

Юрий Эммануилович Васильев — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой дорожно-строительных материалов; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);** 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 285866, Scopus: 57205604432, ResearcherID: I-8197-2013, ORCID: 0000-0002-1634-0152; vashome@yandex.ru, yu.vasilev@madi.ru;

Ульяна Олеговна Менькина — ассистент, аспирант кафедры дорожно-строительных материалов; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);** 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; SPIN-код: 7165-0852; Uliana.mienkina@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Petrova L.M., Zajdullin I.M., Abbakumova N.A., Husnutdinov I.SH., Kashapova R.R. Informativeness of the parameters of the composition and structure of bitumen to assess their resistance to aging. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011; 10:131-134. EDN NXAIRD. (rus.).

2. Pechenyi B.G., Kurbatov V.L., Losev V.P. On the mechanism of bitumen aging and methods of their testing. *University Science*. 2019; 2(8):28-32. EDN NESZAL. (rus.).

3. Okhotnikova E.S., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Romanov G.V., Frolov I.N. Express-method of determination of the content of resins and asphaltenes in bitumens by thermal analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(24):44758-44763. EDN WPDVMB.

4. Ermolaev D.V., Mingaleeva G.R. Mechanism of thermal decomposition of asphaltenes of natural bi-

tumen. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(12):27-31. EDN UBLWFZ. (rus.).

5. Erofeev V.T., Likomaskina M.A., Afonin V.V., Arkhipova A.I. A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(10):1358-1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371 (rus.).

6. Shekhovtsova S., Korolev E. Interfacial phenomena at the interface in the system “Carbon Primary Materials-Water Solutions of Surfactants” for cement materials. *Materials*. 2022; 15(2):556. DOI: 10.3390/ma15020556

7. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:80-85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80

8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Micro-

biologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cement and Concrete Research*. 2015; 77:16-25. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.011

9. Radovsky B.S., Teltaev B.B. Viscoelastic characteristics of bitumen and their assessment by standard indicators. *Highways*. 2013; 8:50-60. (rus.).

10. Bulatović V.O., Rek V., Marković K.J. Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2014; 46(5):448-469. DOI: 10.1177/0095244312469964

11. Teltayev B., Amirbayev E., Radovskiy B. Evaluating the Effect of Polymer Modification on the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder. *Polymers*. 2022; 14(13):2548. DOI: 10.3390/polym14132548

12. Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V. et al. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: The rosary-type structure. *Energy & Fuels*. 2007; 21(4):2165-2175. DOI: 10.1021/ef070089v

13. Rossi C.O., Caputo P., Ashimova S., Fabozzi A., D'Errico G., Angelico R. Effects of natural antioxidant agents on the bitumen aging process: An EPR and rheological investigation. *Applied Sciences*. 2018; 8(8):1405. DOI: 10.3390/app8081405

14. Zaidullin I.M., Petrova L.M., Yakubov M.R., Borisov D.N. Variation of the composition of asphaltenes in the course of bitumen aging in the presence of antioxidants. *Journal of Applied Chemistry*. 2013; 86(7):1137-1142. EDN AYVSZL. (rus.).

15. Ojum C., Kuna K., Thom N.H., Airey G.D. An investigation into the effects of accelerated curing on cold recycled bituminous mixes. *Asphalt Pavements*. 2014; 1177-1188. DOI: 10.1201/b17219-144

16. Shaban S.M. Effect of stearic acid on the mechanical properties and UV stability of LDPE. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009; 113(4):2114-2122.

17. Kim S.K. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011; 119(6):3483-3490.

18. Lee K.S. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polystyrene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011; 120(5):2705-2711.

19. Shirkunov A.S., Ryabov V.G., Kudinov A.V., Nechaev A.N., Degtyannikov A.S. Production of petroleum road bitumen with increased resistance against aging. *Oil and Gas Studies*. 2010; 5(83):89-94. EDN NTOHRJ. (rus.).

20. Opanasenko O.N., Luksha O.V., Zhigalova O.L., Krutko N.P., Chernetskaya V.M., Kozinets T.A. The effect of chemical modifiers' functional groups on the oil bitumen thermal stability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2015; 1:101-106. EDN TLCRLT. (rus.).

21. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A., Korolev E.V. Criterial estimation of thermal destructive processes in asphalt concrete on the basis of oxidized and residual bitumen. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 5(713):58-70. EDN XZOIJN. (rus.).

Received June 8, 2023.

Adopted in revised form on September 25, 2023.

Approved for publication on September 26, 2023.

BIONOTES: **Nikolay I. Shestakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; Nik.shestakov.1990@mail.ru, SHestakovNI@mgsu.ru;

Natalia V. Khokhlova — postgraduate, lecturer of special disciplines; **Moscow Automobile and Road College named after A.A. Nikolaev**; 81 Bakuninskaya st., Moscow, 105082, Russian Federation; SPIN-code: 4600-7174, ORCID: 0000-0003-4471-1827; Natalyahoh@bk.ru;

Yuri E. Vasiliev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of of the Department of Road Construction Materials; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 285866, Scopus: 57205604432, ResearcherID: I-8197-2013, ORCID: 0000-0002-1634-0152; vashome@yandex.ru, yu.vasilev@madi.ru;

Uliana O. Menkina — assistant, postgraduate student of the Department of Road Construction Materials; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; SPIN-code: 7165-0852; Uliana.mienkina@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.