

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 233–250.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 233–250.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625 7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250

EDN: VWBDUN

ВЛИЯНИЕ БИТУМНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА СВОЙСТВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**Лионель Мавунгу Макая, Любовь Сергеевна Зарапина,
Константин Анатольевич Андрианов, Анатолий Федорович Зубков**
*Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* При производстве работ по капитальному ремонту дорожных покрытий нежесткого типа и реконструкции автомобильных дорог возникает необходимость разрушения старого покрытия, которое выполняют дорожными фрезами. В процессе холодного фрезирования старого покрытия получают материал в виде гранул, поверхность которых покрыта битумной пленкой. С течением времени битумная пленка теряет свои свойства, и для повторного использования полученного материала необходимо восстановить свойства вяжущего. Введение битумной эмульсии в состав асфальтогранулята позволяет восстановить свойства вяжущего в смеси, что влияет не только на прочностные характеристики асфальтогранулобетонной смеси, но и на деформативную способность и жесткость слоя смеси при действии нагрузки в процессе уплотнения.

Цель. Установить влияние содержания вяжущего на деформативную способность и жесткость слоя из асфальтогранулобетонных смесей.

Материалы и методы. Асфальтогранулят фракций 8/16 и 18/36 мм при содержании остаточного битума 2 %. В качестве вяжущего материала применялась битумная эмульсия ЭБК-2. Для определения предела прочности слоя асфальтогранулобетона изготавливались образцы с разным содержанием битумной эмульсии согласно ГОСТ 12801. Измерение деформации слоя смеси выполнялось с помощью гидравлического пресса ТП-1-1500.

Результаты исследований. Представлены результаты исследования по влиянию содержания битумной эмульсии на деформацию и жесткость слоя асфальтогранулобетонной смеси при устройстве дорожных одежд автомобильных дорог.

Выводы. Установлено, что применение битумной эмульсии при регенерации асфальтогранулята влияет на деформативную способность и жесткость слоя при действии уплотняющей нагрузки. Установлены закономерности развития деформации и жесткости слоя смеси под действием нагрузки при разном содержании вяжущего, размере фракций асфальтогранулята и разной толщине слоя при укладке. Представлены аналитические зависимости для расчета деформации и жесткости слоя от нагрузки, толщины слоя при укладке и процентного содержания битумной эмульсии в смеси.

Ключевые слова: асфальтогранулобетонная смесь, битумная эмульсия, деформация и жесткость слоя

Для цитирования: Макая Л.М., Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние битумной эмульсии на свойства асфальтогранулобетонной смеси при устройстве покрытий нежесткого типа автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 233–250. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. EDN: VWBDUN

ORIGINAL ARTICLE

BITUMEN EMULSION EFFECT ON PROPERTIES OF ASPHALT-CONCRETE MIX FOR NON-RIGID ROAD PAVEMENTS

**Lionel M. Makaya, Lyubov' S. Zarapina,
Konstantin A. Andrianov, Anatolii F. Zubkov**
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. During major repairs of non-rigid road surfaces and reconstruction of automobile roads, it is necessary to remove old coating with road cutters. During cold milling of the old coating, the material acquires the form of granules with the surface covered with a bitumen film. Over time, the bitumen film loses its properties, and to reuse the material, it is necessary to restore the binder properties. The introduction of the bitumen emulsion in the composition of asphalt-concrete mix, allows to restore the binder properties affecting not only strength properties of the asphalt-concrete mix, but also deformability and stiffness of the mixture layer under the compressive load.

Purpose: Evaluation of the influence of the binder content on deformability and stiffness of the asphalt-concrete mix.

Methodology: Asphalt granulate fractions are used in proportions 8 to 16 and 18 to 36 mm with a residual bitumen content of 2%. The bitumen emulsion EBK-2 is used as a binder. The ultimate strength of the asphalt layer is measured according to GOST 12801. Deformation of the mixture layer is measured on a TP-1-1500 hydraulic press.

Research findings: The bitumen emulsion effect is shown for deformation and stiffness of the asphalt-concrete mix for the pavement construction.

Value: It is shown that the bitumen emulsion in regeneration of asphalt granulate affects deformability and stiffness of the layer subjected to compaction load. The development of deformation and stiffness of the mixture layer under the load with different binder content, particles size, and layer thickness are established. Analytical dependences are suggested for deformation and stiffness of the loaded layer, its thickness during paving, and percentage of bitumen emulsion in the mixture.

Keywords: asphalt-concrete mix, bitumen emulsion; deformation and stiffness

For citation: Makaya L.M., Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Bitumen emulsion effect on properties of asphalt-concrete mix for non-rigid road pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 233–250. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. EDN: VWBDUN

Введение

При капитальном ремонте и реконструкции автомобильных дорог возникает необходимость разрушения старого асфальтобетонного покрытия, которое выполняют с применением холодных дорожных фрез. В процессе фрезерования асфальтобетонного покрытия получают материал в виде гранул,

поверхность которых покрыта битумной пленкой. Битум на поверхности минеральной частицы покрытия за счет термоокислительных процессов меняет свойства, снижается способность воспринимать внешнюю нагрузку под воздействием транспортных средств и погодных факторов.

Установлено, что содержание битума в материале после холодного фрезерования старого асфальтобетонного покрытия находится в пределах от 2 до 4 %, что позволяет уменьшить расход вяжущего для приготовления асфальтогранулобетонных смесей при одновременном сокращении расходов на минеральные материалы при устройстве дорожных одежд.

Для регенерации асфальтогранулята используют различные вяжущие материалы, в зависимости от которых смеси имеют разные физико-механические характеристики и скорость структурообразования, что позволяет применять их при устройстве дорожных слоев на всех категориях автомобильных дорог. Введение вяжущего в асфальтогранулят влияет на его деформативность, жесткость и прочность [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Анализ работ по применению асфальтогранулобетонных смесей для устройства дорожных одежд автомобильных дорог показал, что битумные эмульсии активно применяются при регенерации асфальтогранулята, позволяют обеспечить более высокие прочностные показатели слоя дорожной одежды. Достижение требуемых характеристик уплотняемого слоя производится с применением механизированного звена машин, выбор параметров которых зависит от конструктивных параметров слоя и свойств уплотняемого материала, зависящих от содержания битумной эмульсии в смеси. Представленные авторами результаты исследований применения битумных эмульсий при регенерации асфальтогранулята характеризуют свойства смеси при конкретном содержании битумной эмульсии в смеси без обобщения влияния ее содержания на деформативные свойства и жесткость слоя смеси при действии уплотняющей нагрузки [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

В работе представлены результаты исследований по влиянию содержания битумной эмульсии в смеси асфальтогранулобетона на деформацию и жесткость слоя при действии нагрузки и конструктивных параметров уплотняемого слоя смеси.

Методика проведения исследования

Эффективность процесса уплотнения зависит от действующей нагрузки и свойств слоя уплотняемого материала и характеризуется величиной необратимой деформации. Введение битумной эмульсии при приготовлении асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативные свойства и жесткость уплотняемого слоя.

За исходный материал принят асфальтогранулят фракций 8/16 и 18/36 мм при содержании остаточного битума 2 %. В качестве вяжущего материала применялась битумная эмульсия ЭБК-2. В процессе приготовления смеси асфальтогранулят нагревали до температуры 90–100 °С. По окончании нагрева в асфальтогранулят добавлялась битумная эмульсия с последующим перемешиванием.

Для определения предела прочности асфальтогранулобетона изготавливались образцы испытываемой смеси с разным содержанием битумной эмульсии

согласно ГОСТ 12801. Прочность образцов в зависимости от времени испытания составляла от 2,8 до 3,0 МПа. Измерение деформации слоя смеси выполнялось на установке, позволяющей измерять деформацию слоя (полную, остаточную и упругую) индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм при контролируемой нагрузке с использованием гидравлического пресса ТП-1-1500. Толщина слоя принималась 0,05; 0,10 и 0,15 м.

Исследовательская часть

Эффективность воздействия уплотняющей нагрузки на слой материала характеризуется величиной необратимой деформации, которая зависит от нагрузки в зоне контакта рабочего органа машины с поверхностью слоя, конструктивных параметров слоя и свойств уплотняемого материала.

Под действием нагрузки в слое возникают деформации, влияющие на изменение характеристик материала (плотность, жесткость, вязкость, пористость). Для уточнения влияния битумной эмульсии при регенерации асфальтогранулята на деформацию слоя при разной толщине и размере гранул смеси проведены исследования.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты измерения деформаций (полная, остаточная и упругая) при действии переменной нагрузки на слой асфальтогранулобетонной смеси фракции 8/16 мм с содержанием битумной эмульсии 4 %.

Таблица 1

Деформация слоя асфальтогранулобетонной смеси фракции 8/16 мм с содержанием битумной эмульсии 4 %

Table 1

Strain parameters of asphalt-concrete mix layer with 8/16 mm fraction and 4% of bitumen emulsion

Напряжение, МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,1 м			Толщина 0,15 м		
	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$
0,5	1,78	0,24	1,54	1,45	0,76	0,69	2,09	1,42	0,67
1,0	2,45	1,34	1,11	2,84	0,6	2,24	2,81	1,71	1,10
2,0	3,00	1,2	1,80	3,37	1,53	1,84	4,40	0,62	3,78
3,0	2,66	1,81	0,85	3,39	1,80	1,59	5,54	1,85	3,69
4,0	2,84	1,4	1,44	3,40	1,64	1,76	2,9	1,05	1,85
5,0	3,37	1,23	2,14	3,60	2,04	1,56	3,05	1,80	1,25
6,0	2,8	1,12	1,68	2,97	1,17	1,80	3,99	2,28	1,71
7,0	3,05	1,65	1,4	3,25	1,61	1,64	3,56	1,96	1,60

По результатам измерения деформаций слоя смеси установлены зависимости величины остаточной деформации от действующей нагрузки при разных размерах асфальтогранулята в смеси, толщины слоя и содержания вяжущего. Полученные результаты представлены на рис. 1.

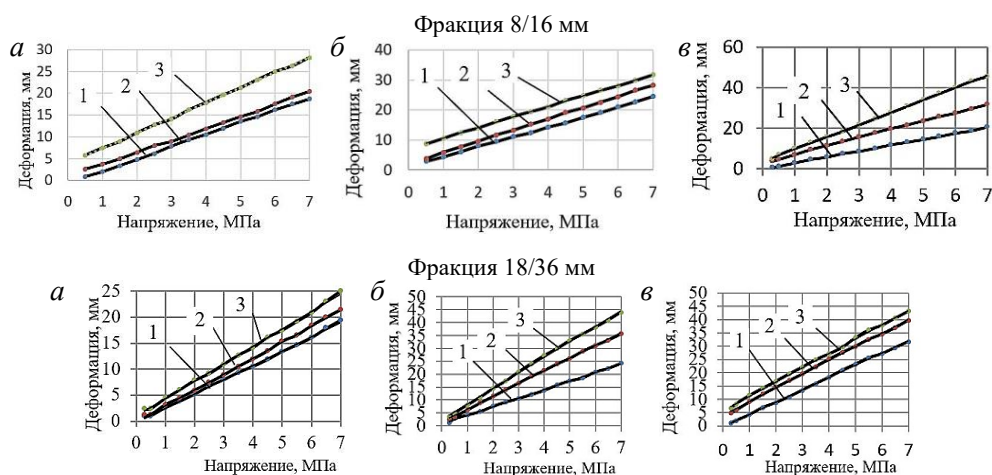


Рис. 1. Зависимость деформации слоя от напряжения при разном содержании эмульсии в смеси:

a – толщина слоя 0,05 м; *б* – 0,10 м; *в* – 0,15 м; 1 – содержание эмульсии 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Fig. 1. Stress-strain curves of different layer thickness and emulsion content:

a – 0.05 m; *b* – 0.10 m; *c* – 0.15 m; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных на рис. 1 результатов видно, что независимо от содержания вяжущего в смеси, толщины слоя при укладке и размера фракции асфальтогранулобетонной смеси между напряжением и деформацией слоя существует линейная зависимость. Численное значение остаточной деформации слоя от нагрузки при разном содержании эмульсии и толщине слоя с учетом размера фракции определяется по формулам, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Зависимости остаточной деформации слоя
асфальтогранулобетонной смеси от напряжения

Table 2

Stress-strain dependence of mix layer

Содержание эмульсии, %	Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
2	0,05	$2,81\sigma - 0,72$	$2,76\sigma - 0,30$
	0,10	$3,30\sigma + 1,15$	$3,33\sigma + 0,66$
	0,15	$2,96\sigma + 0,14$	$4,63\sigma - 0,38$
4	0,05	$2,76\sigma + 0,90$	$3,0\sigma - 0,15$
	0,10	$3,74\sigma + 2,05$	$4,96\sigma + 1,43$
	0,15	$4,13\sigma + 2,95$	$5,17\sigma + 3,91$
6	0,05	$3,47\sigma + 3,92$	$3,35\sigma + 0,97$
	0,10	$3,52\sigma + 7,09$	$6,04\sigma + 2,26$
	0,15	$6,06\sigma + 3,66$	$5,39\sigma + 5,76$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,98–0,99.

Для установления общей зависимости деформации при заданной толщине слоя от напряжения с учетом содержания эмульсии представим данные на рис. 1 в относительных значениях, принимая деформацию каждого слоя при напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния напряжения на деформацию слоя ($K_{\sigma\epsilon}$).

Зависимость коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ от напряжения для фракции 8/16 мм с учетом толщины слоя представлена на рис. 2.

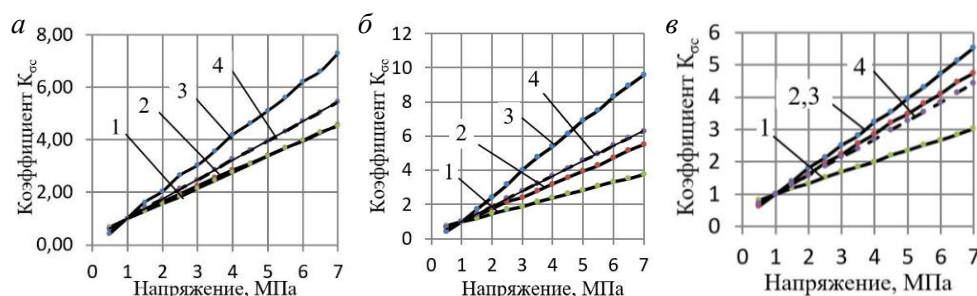


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ от напряжения для фракции 8/16 мм:

a – 0,05 м; b – 0,10 м; c – 0,15 м; 1 – 2 % эмульсии; 2 – 4 %; 3 – 6 %; 4 – общая зависимость

Fig. 2. Stress-strain curves for 8/16 mm fraction at different layer thickness and emulsion content:

a – 0.05 m; b – 0.10 m; c – 0.15 m; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %, 4 – general

Аналогичные зависимости установлены для фракции 18/36 мм. Численное значение коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ при заданной толщине слоя и разном содержании битумной эмульсии в смеси представлено в табл. 3.

Таблица 3

Зависимости для расчета коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$

Table 3

Calculation parameters for coefficient $K_{\sigma\epsilon}$

Толщина слоя, м	Содержание эмульсии, %	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	2	$1,44\sigma - 0,37$	$1,1\sigma - 0,167$
	4	$0,60\sigma + 0,38$	$0,982\sigma - 0,09$
	6	$1,03\sigma - 0,03$	$0,768\sigma + 0,19$
0,10	2	$0,75\sigma + 0,24$	$0,795\sigma + 0,187$
	4	$2,79\sigma + 1,52$	$0,796\sigma + 0,249$
	6	$0,60\sigma + 0,38$	$0,741\sigma + 0,297$
0,15	2	$0,47\sigma + 0,53$	$1,134\sigma - 0,094$
	4	$0,33\sigma + 0,67$	$0,567\sigma + 0,451$
	6	$0,60\sigma + 0,38$	$0,467\sigma + 0,525$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Из представленных в табл. 3 зависимостей видно, что независимо от содержания битумной эмульсии в смеси развитие деформации слоя характеризуется линейной зависимостью, и в зависимости от толщины слоя значение коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ определяется по формулам, представленным в табл. 4.

Таблица 4

Зависимости для расчета коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$

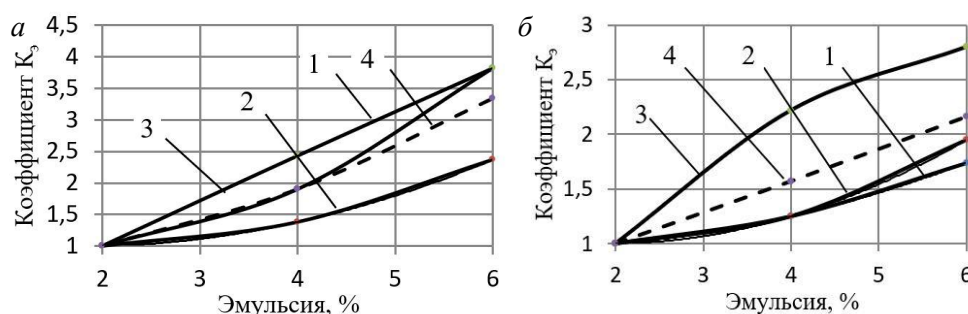
Table 4

Calculation parameters for coefficient $K_{\sigma\epsilon}$

Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	$0,88\sigma + 0,13$	$0,95\sigma - 0,02$
0,10	$0,57\sigma + 0,43$	$0,78\sigma + 0,24$
0,15	$0,74\sigma + 0,27$	$0,72\sigma + 0,29$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Из представленных на рис. 2 данных видно, что необратимая деформация независимо от толщины слоя зависит от содержания битумной эмульсии в смеси. Для уточнения влияния содержания эмульсии в смеси принимаем деформацию слоя при напряжении 1,0 МПа и содержании эмульсии 2 % каждого слоя за единицу. Обозначим данную величину через коэффициент влияния эмульсии на величину деформации слоя ($K_{жэ}$). Влияние содержания эмульсии на величину коэффициента $K_{жэ}$ для разных фракций смеси представлено на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{жэ}$ от толщины слоя:

a – фракция 8/16 мм; *b* – фракция 18/36 мм; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – общая зависимость

Fig. 3. Dependence between stiffness coefficient and layer thickness:

a – 8/16 mm fraction; *b* – 18/36 mm fraction; 1 – 0.05 m; 2 – 0.10 m; 3 – 0.15 m; 4 – general dependence

Из представленных данных на рис. 3 видно, что содержание эмульсии в смеси влияет на величину коэффициента $K_{жэ}$, он возрастает с увеличением ее в смеси. Численное значение коэффициента $K_{жэ}$ определяется по формулам, представленным в табл. 5.

Таблица 5

Зависимости для расчета коэффициента $K_{жэ}$

Table 4

Calculation parameters for coefficient $K_{жэ}$

Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	$0,127\mathcal{E}^2 - 0,315\mathcal{E} + 1,12$	$0,03\mathcal{E}^2 - 0,055\mathcal{E} + 0,99$
0,10	$0,0762\mathcal{E}^2 - 0,267\mathcal{E} + 1,23$	$0,056\mathcal{E}^2 - 0,213\mathcal{E} + 1,2$
0,15	$-0,005\mathcal{E}^2 + 0,75\mathcal{E} - 0,47$	$-0,08\mathcal{E}^2 + 1,09\mathcal{E} - 0,86$
Общая	$0,55e^{0,33\mathcal{E}\%}$	$0,69e^{0,193\mathcal{E}\%}$

Примечание. $\mathcal{E}$ – процентное содержание эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,98–0,99.

С учетом установленных значений коэффициентов $K_{сс}$ и $K_{жэ}$ величина остаточной деформации для каждого слоя асфальтогранулобетонной смеси при действии нагрузки определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$\lambda_{0,05} = 1,95K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,10} = 4,44K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,15} = 2,85K_{сс}K_{жэ}; \quad (1)$$

– фракция 18/36 мм:

$$\lambda_{0,05} = 2,53K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,10} = 4,16K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,15} = 4,08K_{сс}K_{жэ}. \quad (2)$$

Из представленных на рис. 3 результатов видно, что в зависимости от толщины слоя и размера фракций асфальтогранулята в смеси содержание битумной эмульсии в составе смеси по-разному влияет на деформацию слоя.

С целью уточнения влияния толщины слоя на его деформацию принимаем: толщину слоя 0,05 м и содержание вяжущего в смеси 2 % – за единицу, независимо от размера фракции. Обозначим принятую величину через коэффициент влияния толщины на деформацию слоя (K_h). Численное значение коэффициента определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_h = -114h^2 + 24,7h + 0,05; \quad (3)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_h = -134h^2 + 32,9h - 0,31, \quad (4)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Анализ установленных закономерностей влияния напряжения и содержания битумной эмульсии в асфальтогранулобетонной смеси на деформацию слоя показал, что имеются общие закономерности отмеченных факторов на развитие деформации.

По результатам экспериментальных исследований установлены общие зависимости влияния напряжения и содержания битумной эмульсии в пределах от 2 до 6 % в зависимости от размера фракций асфальтогранулята в смеси, которые имеют вид:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{сф} = 0,73\sigma + 0,27; \quad K_{эф} = 0,55e^{0,33\mathcal{E}\%}; \quad (5)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{\sigma\phi} = 0,71\sigma + 0,29; \quad K_{\varepsilon\phi} = 0,69e^{0,193\varepsilon\%}, \quad (6)$$

где σ – напряжение в зоне контакта с поверхностью слоя, МПа; $\varepsilon\%$ – процентное содержание эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

В конечном виде зависимости для определения остаточной деформации асфальтогранулобетонной смеси при действии напряжения, содержания битумной эмульсии в смеси и толщины слоя при укладке определяются по формулам:

– для фракции 8/16 мм:

$$\lambda = 1,07K_{\sigma}K_{\varepsilon}e^{0,33\varepsilon\%}; \quad (7)$$

– для фракции 18/36 мм:

$$\lambda = 1,75K_{\sigma}K_{\varepsilon}e^{0,193\varepsilon\%}. \quad (8)$$

С целью уточнения влияния битумной эмульсии в процессе регенерации асфальтогранулята на остаточную деформацию слоя смеси использованы результаты измерения деформации асфальтогранулята без добавления эмульсии.

Принимая деформацию слоя асфальтогранулята без эмульсии за единицу, устанавливаем общее влияние эмульсии на деформацию слоя, которая представлена на рис. 4.

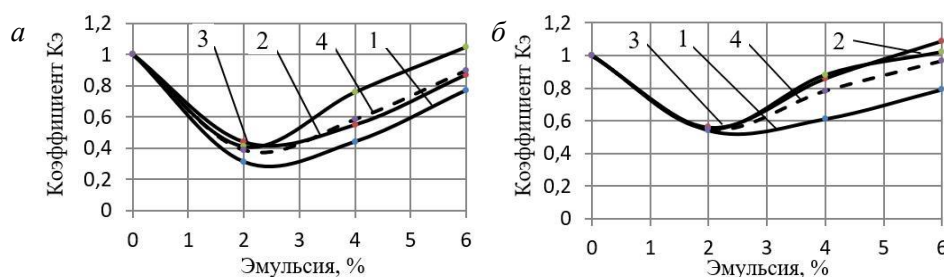


Рис. 4. Влияние содержания эмульсии на деформацию слоя асфальтогранулобетонной смеси:

а – фракция 8/16 мм; б – 18/36 мм; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – общая зависимость

Fig. 4. Influence of emulsion content on deformation of asphalt-concrete mix layer:

а – 8/16 mm; б – 18/36 mm; 1 – 0.05 m; 2 – 0.10 m; 3 – 0.15 m; 4 – total dependence

Из представленных результатов исследования видно, что введение в состав асфальтогранулята битумной эмульсии в процессе приготовления асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативную способность смеси независимо от толщины слоя и размера фракций. При добавлении эмульсии до 2 % в состав асфальтогранулята происходит снижение деформативной способности уплотняемого слоя, что можно объяснить увеличением сил сцепления при образовании контактов между частицами смеси. С повышением содержания эмульсии в смеси сопротивление действующей нагрузке снижается за счет увеличения толщины битумной пленки на поверхности частиц, которая выполняет роль смазки при образовании контактов частиц асфальтогранулята при формировании структуры слоя.

Выбор параметров уплотняющих машин зависит от жесткости слоя материала. Изменение деформативной способности слоя асфальтогранулобетонной смеси при введении битумной эмульсии приводит к изменению жесткости слоя.

Анализ параметров катков показал, что каждый каток соответствует определенной области эффективного применения в соответствии со своими силовыми характеристиками. За величину, характеризующую необходимую нагрузку для обеспечения единичной деформации слоя, принят коэффициент жесткости ($K_{ж}$).

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента жесткости смеси фракций 8/16 и 18/36 мм от напряжения при разном содержании битумной эмульсии в слое толщиной 0,10 м.

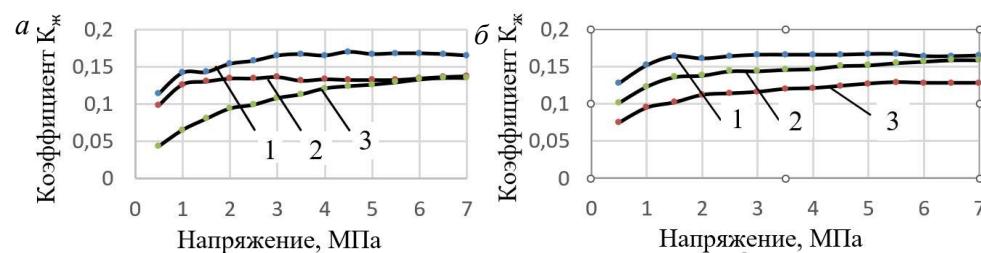


Рис. 5. Зависимость коэффициента жесткости смеси от напряжения при разном содержании битумной эмульсии в смеси:

a – фракция 8/16 мм; *б* – 18/36 мм; 1 – содержание эмульсии 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Fig. 5. Dependence of mixture stiffness coefficient on stress at different content of bitumen emulsion:

a – 8/16 mm; *b* – 18/36 mm; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных на рис. 5 данных видно, что жесткость слоя зависит от содержания эмульсии в смеси, размера фракции и действующего напряжения на слой материала. С повышением содержания битумной эмульсии в смеси значение коэффициента $K_{ж}$ понижается независимо от размера фракции смеси, что объясняется повышением толщины битумной пленки в зоне контакта частиц смеси.

На начальном этапе действия нагрузки жесткость слоя повышается за счет роста плотности слоя материала (уменьшения пористости), и при достижении определенной величины нагрузки жесткость слоя стабилизируется. В зависимости от толщины слоя и размера фракции смеси стабилизация жесткости слоя различна. Если при толщине слоя 0,05 мм фракции 8/16 мм коэффициент стабилизируется при достижении напряжения 3,0 МПа, то для фракции 18/36 мм это происходит при напряжении 1,5 МПа. С повышением толщины слоя коэффициент жесткости существенно зависит от размера фракций асфальтогранулята в смеси. При устройстве слоя толщиной 0,10 и 0,15 м фракции 8/16 мм стабилизация коэффициента жесткости наблюдается при напряжении соответственно 1,0 и 5,0 МПа, а для фракции 18/36 мм стабилизация жесткости происходит при напряжении 2,0 МПа. С увеличением содержания битумной эмульсии, за счет повышения битумной пленки на поверхности частиц асфальтогранулята, жесткость слоя понижается. Аналогичные за-

кономерности влияния битумной эмульсии на жесткость слоя наблюдаются при укладке смеси толщиной 0,05 и 0,15 м.

Для уточнения влияния напряжения на жесткость слоя толщиной 0,10 м при разном содержании битумной эмульсии представим данные на рис. 5 в относительных значениях, принимая значения коэффициента жесткости каждого слоя при напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния напряжения на коэффициент жесткости слоя ($K_{ж\sigma}$).

Зависимости коэффициента жесткости слоя от напряжения для слоев фракции 8/16 мм и 18/36 мм с учетом содержания битумной эмульсии в смеси представлены на рис. 6.

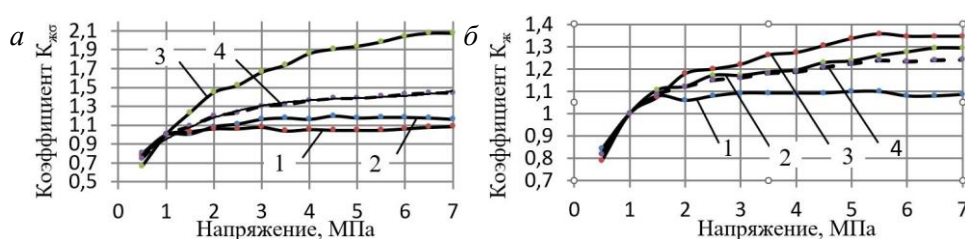


Рис. 6. Зависимости коэффициента $K_{ж\sigma}$ слоя от напряжения и содержания эмульсии в смеси:
а – фракция 8/16 мм; б – 18/36 мм; 1 – 2 % битумной эмульсии; 2 – 4 %; 3 – 6 %; 4 – общая зависимость

Fig. 6. Dependence of layer stiffness coefficient on stress at different content of bitumen emulsion in the mixture:
а – 8/16 mm; б – 18/36 mm; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных данных на рис. 6 видно, что имеется общая закономерность влияния напряжения на коэффициент жесткости слоя, что позволяет уточнить влияние эмульсии на коэффициент жесткости при разном ее содержании с учетом толщины слоя.

Численное значение коэффициента $K_{ж\sigma}$ для слоев толщиной 0,10 м определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж\sigma} = 0,0055\sigma^3 - 0,083\sigma^2 + 0,44\sigma + 0,588; \quad (9)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж\sigma} = 0,0043\sigma^3 - 0,062\sigma^2 + 0,3\sigma + 0,723, \quad (10)$$

где σ – действующее напряжение, МПа; $K_{ж\sigma}$ – коэффициент жесткости, безразмерная величина. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,96–0,98.

Установлено, что содержание битумной эмульсии в смеси влияет на жесткость слоя независимо от размера фракций асфальтогранулобетонной смеси. При укладке слоя фракции 8/16 мм в зависимости от изменения содержания эмульсии коэффициент $K_{ж\sigma}$ находится в интервале от 1,1 до 2,1, а для фракции 18/36 мм коэффициент изменяется в пределах от 1,1 до 1,35.

Для установления влияния битумной эмульсии в смеси на коэффициент жесткости слоя для разных фракций при толщине слоя 0,10 м представим данные на рис. 6 в относительных значениях. Принимаем коэффициент жест-

кости каждого слоя фракции при разном содержании эмульсии за единицу и обозначим данную величину коэффициентом влияния эмульсии в смеси ($K_{жэ}$). Численное значение данного коэффициента определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{жэ} = -0,0395Э^2 + 0,181Э + 0,797; \quad (11)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{жэ} = 0,0699Э^2 - 0,607Э + 1,934, \quad (12)$$

где $Э$ – содержание битумной эмульсии в смеси, %. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

С учетом полученных значений коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ зависимости для расчета коэффициента жесткости слоя толщиной 0,10 м определяются по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж} = 0,142K_{жс}K_{жэ}, \text{ МПа/мм}, \quad (13)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж} = 0,152K_{жс}K_{жэ}, \text{ МПа/мм}. \quad (14)$$

Влияние битумной эмульсии на коэффициент жесткости слоя асфальто-гранулобетонной смеси при толщине слоя 0,05 и 0,15 м и содержании битумной эмульсии от 2 до 6 % представлено на рис. 7.

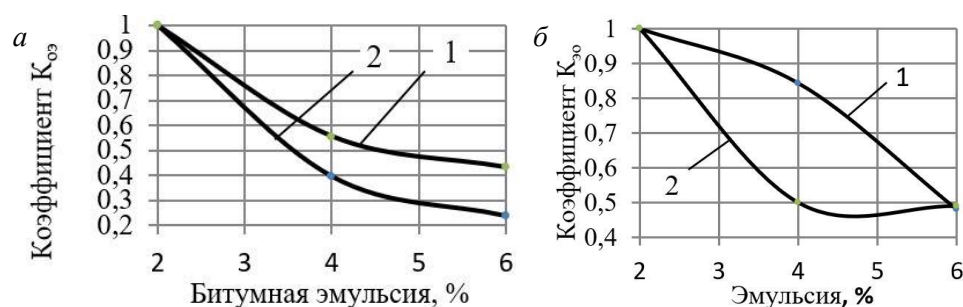


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K_{ж}$ для слоев толщиной 0,05 и 0,10 м при разном содержании битумной эмульсии в смеси

Fig. 7. Dependences of stiffness coefficient for 0.05 and 0.10 m layers at different content of bitumen emulsion

Из представленных данных на рис. 7 видно, что с повышением содержания битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси происходит снижение величины коэффициента жесткости слоя.

Численные значения коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ для слоев толщиной 0,05 и 0,15 м представлены в табл. 6.

С учетом установленных зависимостей для определения коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ при укладке слоев толщиной 0,05 и 0,15 м общий коэффициент жесткости слоя определяется по формулам, МПа/мм:

– толщина слоя 0,05 м:

$$\text{фракция 8/16 мм: } K_{ж} = 0,391K_{жс}K_{жэ}; \text{ фракция 18/36 мм: } K_{ж} = 0,225K_{жс}K_{жэ}; \quad (15)$$

– толщина слоя 0,15 м:

$$\text{фракция } 8/16 \text{ мм: } K_{\text{ж}} = 0,169K_{\text{ж}\sigma}K_{\text{ж}\varepsilon}, \text{ фракция } 18/36 \text{ мм: } K_{\text{ж}} = 0,114K_{\text{ж}\sigma}K_{\text{ж}\varepsilon}. \quad (16)$$

Таблица 6

Значение коэффициентов $K_{\text{ж}\sigma}$ и $K_{\text{ж}\varepsilon}$ для расчета деформации слоя асфальтогранулобетонной смеси

Table 6

Stiffness coefficients for layer deformation analysis

Фракция, мм	Толщина слоя, м	$K_{\text{ж}\sigma}$	$K_{\text{ж}\varepsilon}$
8/16	0,05	$0,004\sigma^3 - 0,058\sigma^2 + 0,257\sigma + 0,76$	$0,055\varepsilon^2 - 0,636\varepsilon + 2,05$
	0,15	$0,001\sigma^3 - 0,024\sigma^2 + 0,13\sigma + 0,883$	$0,04\varepsilon^2 - 0,462\varepsilon + 1,764$
18/36	0,05	$0,001\sigma^3 - 0,02\sigma^2 + 0,094\sigma + 0,922$	$-0,025\varepsilon^2 + 0,076\varepsilon + 0,95$
	0,15	$0,00\sigma^3 - 0,105\sigma^2 + 0,539\sigma + 0,521$	$0,061\varepsilon^2 - 0,617\varepsilon + 1,99$

Установлено, что имеются общие закономерности влияния битумной эмульсии и действующего напряжения на коэффициент жесткости слоя независимо от толщины, что позволяет установить общую зависимость для расчета коэффициента жесткости. Общая зависимость влияния напряжения на коэффициент жесткости смеси определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{\text{ж}} = 0,004\sigma^3 - 0,0557\sigma^2 + 0,276\sigma + 0,745; \quad (17)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{\text{ж}} = 0,004\sigma^3 - 0,063\sigma^2 + 0,312\sigma + 0,722, \quad (18)$$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Толщина слоя влияет на необратимую деформацию при действии нагрузки, а следовательно, и на коэффициент жесткости слоя. С учетом принятия коэффициента жесткости слоя при толщине слоя 0,05 м за единицу при действии нагрузки 1,0 МПа и содержании битумной эмульсии в смеси 2 % установлено влияние толщины слоя на коэффициент жесткости асфальтогранулобетонной смеси.

Численное значение коэффициента K_h для разного состава смеси определяется по формулам:

– для фракции 8/16 мм:

$$K_h = 31,6h^2 - 11,22h + 1,48; \quad (19)$$

– для фракции 18/36 мм:

$$K_h = 112h^2 - 28,8h + 2,16, \quad (20)$$

где h – толщина слоя при укладке, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Введение в состав смеси битумной эмульсии влияет на коэффициент жесткости слоя. Для установления влияния содержания битумной эмульсии проведено сравнение коэффициента жесткости слоя с жесткостью слоя ас-

фальтогранулята без добавления эмульсии. С учетом принятия коэффициента жесткости слоя без добавления эмульсии за единицу на рис. 8 представлено влияние битумной эмульсии на коэффициент жесткости слоя смеси при разном процентном содержании битумной эмульсии.

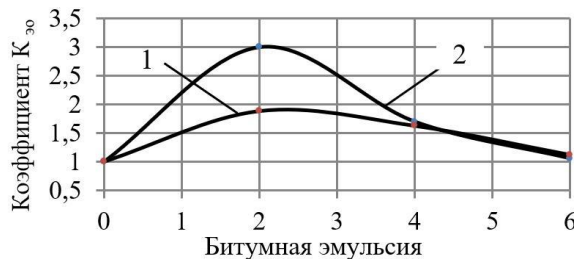


Рис. 8. Влияние содержания битумной эмульсии на величину коэффициента K_{30} :

1 – фракция 8/16 мм; 2 – фракция 18/36 мм

Fig. 8. Influence of bitumen emulsion content on coefficient K_{30} :

1 – 8/16 mm; 2 – 18/36 mm

Из представленных данных на рис. 8 видно, что при добавлении эмульсии до 2 % в состав смеси коэффициент K_{30} возрастает. Это объясняется тем, что при незначительном введении битумной эмульсии в состав смеси на поверхности частиц асфальтогранулята образуется битумная пленка, за счет которой возрастает сцепление между частицами смеси, что приводит к повышению жесткости слоя под действием нагрузки. С увеличением содержания битумной эмульсии в смеси толщина пленки на поверхности частиц асфальтогранулята возрастает, что приводит к снижению сил сцепления между частицами и понижению жесткости слоя.

Численное значение коэффициента жесткости слоя асфальтогранулобетонной смеси при разном содержании эмульсии в смеси определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{30} = 0,082\mathcal{E}^3 - 0,907\mathcal{E}^2 + 2,485\mathcal{E} + 1; \quad (21)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{30} = 0,0182\mathcal{E}^3 - 0,256\mathcal{E}^2 + 0,882\mathcal{E} + 1, \quad (22)$$

где $\mathcal{E}$ – процентное содержание битумной эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Общий коэффициент жесткости уплотняемого слоя асфальтогранулобетонной смеси с учетом размера фракции гранулята определяется по формулам, МПа/мм:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж} = 0,391K_{ж\sigma}K_{ж\mathcal{E}}K_h; \quad (23)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж} = 0,225K_{ж\sigma}K_{ж\mathcal{E}}K_h. \quad (24)$$

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Введение в состав асфальтогранулята битумной эмульсии в процессе приготовления асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативную способность смеси независимо от толщины слоя и размера фракций смеси. При добавлении эмульсии в состав смеси до 2 % происходит снижение деформативной способности слоя, что можно объяснить увеличением сил сцепления при образовании контактов между частицами смеси. С повышением содержания эмульсии в смеси сопротивление действующей нагрузке снижается за счет увеличения толщины битумной пленки на поверхности частиц, которая выполняет роль смазки при контактировании частиц асфальтогранулята под действием нагрузки при формировании структуры слоя.

– Содержание битумной эмульсии в смеси при действии нагрузки влияет на жесткость слоя независимо от размера фракций асфальтогранулобетонной смеси. Жесткость слоя смеси зависит от ее фракционного состава. Содержание битумной эмульсии в составе смеси до 2 % приводит к повышению жесткости уплотняемого слоя. При устройстве слоя фракции 8/16 мм коэффициент $K_{жс}$ возрастает в 2 раза, а при устройстве слоя фракции 18/36 мм – в три раза. При дальнейшем повышении содержания битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси происходит снижение коэффициента жесткости слоя.

– При выборе параметров уплотняющих машин для обеспечения качества работ при устройстве дорожных одежд необходимо учитывать содержание битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд : труды Союздорнии. Москва, 1980. С. 64–71.
2. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 1989. № 5. С. 12–13.
3. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. № 10. С. 8–9.
4. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог / под ред. С.Г. Цупикова. Москва : Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.
5. Калгин Ю.И., Строкін А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж : Воронежская областная типография, 2014. 223 с.
6. Руденский А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дорожном деле : науч.-техн. информ. сб. Москва : Информавтодор, 2006. Вып. 1. С. 11–42.
7. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. универ-та, 2006. 272 с.
8. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Антонов А.И., Однолько В.Г. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. 316 с.
9. Сенибабнов С.А., Архелов И.С., Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М. Расчет напряжений в зоне контакта вальца с уплотняемым материалом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611722.
10. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М., Пилецкий М.Э. Расчет деформаций материала при действии динамической нагрузки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663676.

11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastyrev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement // *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. V. 18. № 2. P. 192–197.
12. Макая Л.М., Зубков А.Ф., Андрианов К.А. Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*. Тамбов, 2023. С. 316–318.
13. Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние свойств материала, получаемого при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (65). С. 85–95.
14. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф., Кузнецов А.А. Определение реологических характеристик асфальтогранулята при устройстве слоев дорожной одежды // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2021. № 1 (12). С. 37–42.
15. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние толщины слоя асфальтогранулята на выбор параметров катков при укреплении обочин автомобильных дорог // *Приволжский научный журнал*. 2020. № 4 (56). С. 163–173.
16. Зарапина Л.С., Макая Л.М., Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Эффективность применения асфальтогранулята при ремонте и реконструкции автомобильных дорог // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Е.М. Чернышова*. Тамбов, 2022. С. 346–349.
17. Зубков А.Ф. Обоснование параметров контакта металлического вальца катка с уплотняемым материалом // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Дорожно-транспортное строительство*. 2004. № 3. С. 77.
18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. № 1 (45). P. 42–54.
19. Зубков А.Ф., Зарапина Л.С., Андрианов К.А. Влияние нагрузки на модуль упругости слоя из асфальтогранулята при восстановлении покрытия дорожной одежды // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (65). С. 96–105.
20. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Сенибабнов С.А. Моделирование процессов уплотнения асфальтогранулята с использованием экспериментальных данных // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*. Тамбов, 2023. С. 293–295.

REFERENCES

1. Harhuta N.Ya. Theory of road pavement compaction. In: *Compaction of earth bed and road covers*. Trudy Soyuzdornii. Moscow, 1980. Pp. 64–71. (In Russian)
2. Permyakov V.B., Zaharenko A.V. Justification of contact pressures for compaction of asphalt concrete mixtures. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1989; (5): 12–13. (In Russian)
3. Permyakov V.B. Compaction efficiency of asphalt concrete mixtures in pavements. *Stroitel'nye materialy*. 2005; (10): 8–9. (In Russian)
4. Tsupikov S.G. (Ed.) Road Master's Handbook. Construction, operation and repair of motorways. Moscow: Infra-Inzheneniya, 2009. 924 p. (In Russian)
5. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. Prospective technologies of construction and repair of road pavements using modified bitumen. Voronezh, 2014. 223 p. (In Russian)
6. Rudenskij A.V. Cold asphalt concrete. Possibilities to extend the season of construction and repair works. *Novosti v dorozhnom dele*. 2006; (1): 11–42. (In Russian)
7. Kalgin Yu.I. Road bituminous-mineral materials based on modified bitumen. Voronezh, 2006. 272 p. (In Russian)
8. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnol'ko V.G. Construction and repair of non-rigid road pavements taking into account temperature regimes of asphalt concrete mix. Tambov, 2017. 316 p. (In Russian)

9. Senibabnov S.A., Arhelov I.S., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M. "Calculation of stresses in the roller and material contact zone", RF Certificate of State Registration of Software N 2020611722. (In Russian)
10. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Pileckij M.E. "Calculation of material deformation under dynamic loads", RF Certificate of State Registration of Software. N 2017663676. (In Russian)
11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastirev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement. *Journal of Applied Engineering Science*. 2020; 18 (2): 192–197. (In Russian)
12. Makaya L.M., Zubkov A.F., Andrianov K.A. Development of a mathematical model of pavement layer compaction processes. In: *Proc. 8th Int. Symp. 'Relevant Problems of Computer Simulation of Structures'*, Tambov, 2023. Pp. 316–318. (In Russian)
13. Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of material properties obtained by cold milling of non-rigid pavements on layer deformation during pavement construction. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2022; 1 (65). 85–95. (In Russian)
14. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Kuznecov A.A. Determination of rheological characteristics of asphalt granulate for pavements. *Vestnik PGUAS: Stroitel'stvo, nauka i obrazovanie*. 2021; 1 (12): 37–42. (In Russian)
15. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of asphalt granulate layer thickness on choice of roller parameters at reinforcement of motorway shoulders. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*. 2020; 4 (56): 163–173. (In Russian)
16. Zarapina L.S., Makaya L.M., Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Efficiency of asphalt granulate application in road repair and reconstruction. In: *Proc. 9th Sci. Conf. 'Stable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport'*, 2022. Pp. 346–349. (In Russian)
17. Zubkov A.F. Parameter justification of contact between metal roller and compacted material. *Dorozhno-transportnoe stroitel'stvo*. 2004; (3): 77. (In Russian)
18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 1 (45): 42–54.
19. Zubkov A.F., Zarapina L.S., Andrianov K.A. Loading effect on elastic modulus of asphalt granular layer during pavement repair. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2022; 1 (65): 96–105. (In Russian)
20. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Senibabnov S.A. Modeling of asphalt granulate compaction processes using experimental data. In: *Proc. 8th Int. Symp. 'Relevant Problems of Computer Modeling of Structures'*. 2023. Pp. 293–295. (In Russian)

Сведения об авторах

Макая Лионель Мавунгу, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, lionelmavungu@mail.ru

Зарпина Любовь Сергеевна, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, lyubov.guseva.2012@bk.ru

Андрянов Константин Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, konst-68@yandex.ru

Зубков Анатолий Федорович, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, afzubkov2013@yandex.ru

Authors Details

Lionel M. Makaya, Research Assistant, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, lionelmavungu@mail.ru

Lyubov' S. Zarapina, Research Assistant, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, lyubov.guseva.2012@bk.ru

Konstantin A. Andrianov, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, konst-68@yandex.ru

Anatolii F. Zubkov, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, afzubkov2013@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023
Одобрена после рецензирования 18.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 28.09.2023
Approved after review 18.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023