

УДК: 691.168  
DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_66  
EDN: DXTELC



## Исследование свойств мелкозернистых асфальтобетонов запроектированных разными методами

Д.С. Смирнов<sup>1</sup>, К.Р. Белаева<sup>1</sup>, О.В. Хохряков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Дорожная одежда предназначена для равномерного распределения давления на грунт от подвижных нагрузок. Наибольшее давление возникает в верхних слоях покрытия и уменьшается по мере увеличения глубины перераспределения. Очевидно, что наиболее интенсивное воздействие как от подвижного состава, так и атмосферных факторов испытывают верхние слои конструкции дорожной одежды. Поэтому для повышения сроков эксплуатации автомобильной дороги, прежде всего, необходимо обеспечить ее качественным материалом покрытия. Целью данного исследования является сравнительный анализ устойчивости асфальтобетонов, подобранных разными методами, к образованию колеи пластичности. Задачами исследования являются: подбор состава методами предельных кривых плотных смесей, объемными методами проектирования, а также проведение оценки физико-механических свойств асфальтобетонных смесей, подобранных различными методами и оценки склонности подобранных составов к образованию колеи пластичности.

**Результаты.** В работе представлены результаты сравнительных испытаний асфальтобетонов, подобранных объемными методами проектирования (SP-16, А16ВН) и методом предельных кривых (тип Б Марки I), а также результаты испытаний образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности. Сравнительные испытания физико-механических свойств асфальтобетонов SP-16, А16ВН и тип Б Марки I показали, что коэффициент водостойкости для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативным параметров и составляет для SP-16(0,96%), для А16ВН (0,93%). Для асфальтобетона Тип Б марки I коэффициент водостойкости составляет (0,79%). Результаты испытаний на образование колеи пластичности показали, для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН колея соответствует требованиям нормативных документов и составляет 2,29 мм и 5,74 мм соответственно, а для асфальтобетона Тип Б марки I составляет 12,22 мм. Коэффициент водостойкости и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I значительно уступает асфальтобетонам SP-16 и А16ВН.

**Выводы.** Результаты проведенного исследования позволят сделать выводы о наиболее эффективных методах подбора асфальтобетонов с точки зрения устойчивости к образованию колеи пластичности. Полученные данные могут быть использованы при строительстве и эксплуатации дорожного покрытия для повышения его долговечности и устойчивости.

**Ключевые слова:** дорожная одежда, асфальтобетон, зерновой состав, морозостойкость, водостойкость, колееобразование.

**Для цитирования:** Смирнов Д.С., Белаева К.Р., Хохряков О.В. Исследование свойств мелкозернистых асфальтобетонов запроектированных разными методами // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 66-76, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_66, EDN: DXTELC

# Investigation of the properties of fine-grained asphalt concrete designed by different methods

D.S. Smirnov<sup>1</sup>, K.R. Belyaeva<sup>1</sup>, O.V. Khokhryakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract.** The road structural layers consist of the underlying layer, the base and the coating layers. It perceives pressures from mobile loads and distributes them along the roadbed. Since the greatest pressure occurs on the surface and decreases in depth, the road needs durable structural layers, which in turn require the use of high-quality materials compacted to a high density. The aim of the work is a comparative analysis of the stability of asphalt concrete, selected by different methods, to the formation of plasticity rutting. The objectives of the study are the selection of composition by methods of limit curves of dense mixtures, volumetric design methods, as well as evaluation of the physical and mechanical properties of asphalt concrete mixtures selected by various methods and evaluation of the propensity of selected compositions to form plasticity rutting.

**Results.** The paper presents the results of comparative tests of asphalt concrete selected by volumetric design methods (SP-16, A16BH) and the method of limit curves (type B Grade I), as well as the results of testing samples of asphalt concrete for the formation of plasticity rutting. Comparative tests of the physical and mechanical properties of asphalt concrete SP-16, A16BH and type B Grade I showed that the coefficient of water resistance for asphalt concrete SP-16 and A16BH meets the requirements of regulatory parameters and is (0.96%) for SP-16, (0.93%) for A16BH. For asphalt concrete Type B grade I, the coefficient of water resistance is (0.79%). The results of tests for the formation of plasticity rutting showed that for asphalt concrete SP-16 and A16BH, the rutting meets the requirements of regulatory documents and is 2.29 mm and 5.74 mm, respectively, and for asphalt concrete Type B grade I is 12.22 mm. The coefficient of water resistance and resistance to rutting of asphalt concrete Type B grade I is significantly inferior to asphalt concrete SP-16 and A16BH.

**Conclusions.** The results of the study will allow us to draw conclusions about the most effective methods of selecting asphalt concrete from the point of view of resistance to the formation of plasticity rutting. The data obtained can be used in the construction and operation of the road surface to increase its durability and stability.

**Keywords:** road structural layers, asphalt concrete, grain composition, frost resistance, water resistance, rutting.

**For citation:** Smirnov D.S., Belyaeva K.R., Khokhryakov O.V. Investigation of the properties of fine-grained asphalt concrete designed by different methods // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 66-76, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_66, EDN: DXTELC

## 1. Введение

Дорожная одежда – это конструктивный элемент дороги, который воспринимает на себя нагрузки от транспортного средства и передает эти напряжения в земляное полотно. Дороги с твердым покрытием имеют асфальтобетонную или цементобетонную поверхность, обладающее соответствующей устойчивостью к скольжению, истиранию, непроницаемостью и долговечностью в сочетании с несущими характеристиками.

Асфальтобетон – это материал, который получают после уплотнения асфальтобетонной смеси, приготовленной в смесителях в нагретом состоянии щебня или гравия, песка, минерального порошка и битума в рационально подобранных соотношениях. [1-3].

В процессе подбора и оптимизации состава асфальтобетонной смеси регулируются: вид применяемых материалов, фракционный состав щебня и песка, наибольшая крупность заполнителя, содержание битума и минерального порошка и других параметров, включая применение различных химических модификаторов и

стабилизирующих добавок. Поэтому составы асфальтобетонных смесей весьма разнообразны и отличаются структурными характеристиками и эксплуатационными свойствами после их укладки в покрытие [4]. Основные механические характеристики воспринимаются твердым каркасом основную функцию, в котором играет щебень, формирующий так называемый каменный скелет.

На сегодняшний день в России асфальтобетон, по ряду причин, является наиболее распространенным видом твердого покрытия. Однако долговечность его значительно уступает покрытию из цементобетона, особенно по таким показателям как образование колеи износа и пластичности. [5-7]. В связи с этим основной задачей при проектировании асфальтобетона является создание структуры, которая обеспечивала бы эксплуатационно-технические характеристики покрытия с учетом воздействия на него атмосферных факторов в определенных дорожно-климатических условиях.

Разработка технических требований к дорожно-строительным материалам является не только материаловедческой, но и экономической задачей. Проектирование асфальтобетонных смесей состоит из трех этапов: определение свойств материала, установление соответствия требованиям и установление рациональных соотношений компонентов для получения требуемых свойств.

Гранулометрический состав асфальтобетонных смесей определяет содержание пор в минеральной части асфальтобетона, что, в свою очередь, определяет количество асфальта в смеси и взаимосвязано с остаточной пористостью. Оптимальная остаточная пористость зависит от вязкости вяжущего и совокупности таких эксплуатационных факторов, как транспорт, атмосфера и климат. Например, маловязкий разжиженный битум требует высокой пористости в асфальтобетоне для обеспечения быстрого испарения легких фракций из битума, что повышает его устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов.

Комплекс эксплуатационных факторов также влияет на выбор марки битума. В холодном климате следует использовать битум с меньшей вязкостью, чем в жарком климате. Интенсивное движение транспортных средств диктует необходимость использования высоковязкого битума. Образование колеи пластичности является одной из проблем, возникающих при использовании асфальтобетона. [8-10].

Сегодня известно множество различных методик проектирования асфальтобетона, но большой интерес представляют методы, наиболее точно характеризующие физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики асфальтобетона – модуль упругости (жесткость) при различных температурах, устойчивость к образованию колеи, чувствительность к влаге (водостойкость), прочность и долговечность асфальтобетона, трещиностойкость.

Экспериментальный, метод кривых и американский метод стандартных смесей – три основных метода подбора плотных смесей. Впервые они были сформулированы в первой половине 20 века и дальнейшем получили широкое распространение [11].

Первый способ заключается в заполнении пор зернами разного размера. Данный способ управления структурой асфальтобетона предполагает проведение оптимизации состава с учетом возможности регулирования технических и экономических показателей. Варьируются параметры раздвижки зерен щебня, гравия и песка, а также концентрация минерального порошка в вяжущем. Содержание компонентов в смеси определялось на основе предварительных значений плотности материала. Окончательный состав определялся экспериментальным путем. Оптимальным считался состав с минимальной пористостью.

Второй метод подбора зернового состава асфальтобетона основан на подборе плотных минеральных смесей, зерновой состав которых приближается к идеальным кривым Фуллера, Графа, Хермана, Боломея, Тэлбота-Ричарда, Китт-Пейфа и других исследователей. Так как по мере повышения плотности упаковки возрастает удельная поверхность заполнителя, идеальная кривая подбирается из условия, чтобы количество пустот в смеси и удельная поверхность требовали минимального расхода вяжущего при обеспечении заданных технических и технологических свойств. Эти кривые представляют собой степенные зависимости, которые отражают требуемое содержание зерна в различных фракциях. В большинстве случаев эти кривые представлены

степенными зависимостями требуемого содержания зерен в смеси от их размера. Этот метод нашел широкое применение в отечественной практике подбора состава асфальтобетонных смесей. В основу данного метода положена теория, предложенная профессором В.В. Охотиным, о том, что наиболее плотную смесь можно получить только при условии, если размер зерен заполнителя, составляющих материал, будет уменьшаться пропорционально. Позже было уточнено соотношение размеров частиц смежных фракций, исключающее раздвижку крупных зерен в многофракционной минеральной смеси. По данным П.И. Боженова, для того чтобы исключить проскальзывание крупных зерен через мелкие зерна, отношение диаметра мелкой фракции к диаметру крупной фракции не должно быть более 0,225 (т.е. как 1:4,44). Существенный вклад в обоснование расчетов при определении оптимальных составов асфальтобетонных смесей внес профессор Н.Н. Иванов, который предложил использовать для подбора смесей кривые гранулометрического состава с коэффициентом сбега в пределах от 0,65 до 0,90 [12-14].

Цель исследования заключается в проведении сравнительного анализа устойчивости асфальтобетонов, приготовленных на одних и тех же материалах, но подобранных разными методами, к данному явлению.

Для достижения этой цели проведены следующие задачи: подбор состава методами предельных кривых плотных смесей, объемными методами проектирования, а также оценка физико-механических свойств асфальтобетонных смесей, подобранных различными методами, и оценка склонности таких составов к образованию колеи пластичности.

## 2. Материалы и методы

В исследованиях был использован асфальтобетон SP-16, A16BH и типа Б марки I. подобранные по нормативам, представленным в таблице 1.

Таблица 1

Применяемые нормативные документы

1	ГОСТ Р 58401.1-2019 «Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования»
2	ГОСТ Р 58406.2-2020 «Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон»
3	ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов.

Зерновые составы асфальтобетонных смесей, подобранных разными методами представлены в таблицах 2, 3, 4.

Таблица 2

Зерновой состав для асфальтобетона SP-16

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.												Содержание вяжущего, %
	31,5	22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	
Фактические значения	100	95,8	65,6	53,6	38,9	23,1	17,9	14,9	12,8	11,4	10,0	8,1	4,9
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	-	90-100	45-86	28-65	24-52	18-28	14-24	-	-	-	-	7-10	

Таблица 3

## Зерновой состав асфальтобетонной смеси марки А16ВН

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.												Содержание вяжущего, %
	31,5	22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	
Фактические значения	100	100	98,1	78,7	63,0	39,8	27,0	18,1	13,7	11,2	9,7	8,1	5,3
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	-	-	90-100	70-85	-	37-58	25-40	-	-	-	7-20	5-9	

Таблица 4

## Зерновой состав асфальтобетонной смеси тип Б марки I

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.											Содержание вяжущего, %
	40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	
Фактические значения	100	98,5	85,7	72,0	58,0	45,4	38,4	30,2	18,5	11,8	9,2	5,4
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	100	90-100	80-100	70-100	50-60	38-60	28-60	20-60	14-34	10-20	6-12	

На первом этапе испытаний определялся предел прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе, а также предельная относительная деформация растяжения. Для этого на нижнюю плиту пресса устанавливали опорное устройство, таким образом, чтобы исключить возможность его перемещения по плите (рис. 1). Расстояние между опорами должно быть  $(20,0 \pm 0,5)$  см. [15], далее испытуемый образец устанавливали на опорное устройство вверх гранью. Сверху на образец устанавливаем стержень, затем опускаем верхнюю плиту обеспечивая зазор между плитой и стержнем в 5 мм. Нагружение испытуемого образца производим со скоростью 10 мм/мин, во время разрушения фиксируем максимальное значение нагрузки для испытуемого образца, которое принимается как разрушающая нагрузка  $P$  (Н), и максимальное значение прогиба в момент разрушения  $l$  пр, см.

Для каждого испытуемого образца вычисляем предел прочности при непрямом растяжении  $S$  кПа по формуле:

$$S = 2000P/\pi hD, \quad (1)$$

где  $P$  – максимальная нагрузка. Н:

$h$  – толщина образца, мм;

$D$  – диаметр образца, мм.

На втором этапе оценивался коэффициент водостойкости TSR, который вычисляется как отношение среднеарифметических пределов прочности при непрямом растяжении между второй и первой группами образцов по формуле:

$$TSR = S2 / S1, \quad (2)$$

где,  $S2$  – среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из второй группы. кПа;

$S1$  – среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из первой группы. кПа.

Образцы второй группы подвергались водонасыщению в разраженной атмосфере вакуумной камеры в течении 10 минут под давлением 20 кПа, после чего проводилось их термостатирование в морозильной камере при минус 20°C в течении 16 часов. Водостойкость асфальтобетона определялось в соответствии с ГОСТ Р 58401.18-2019 на образцах высотой 95 мм уплотненных на гираторе с содержанием воздушных пустот 7%.

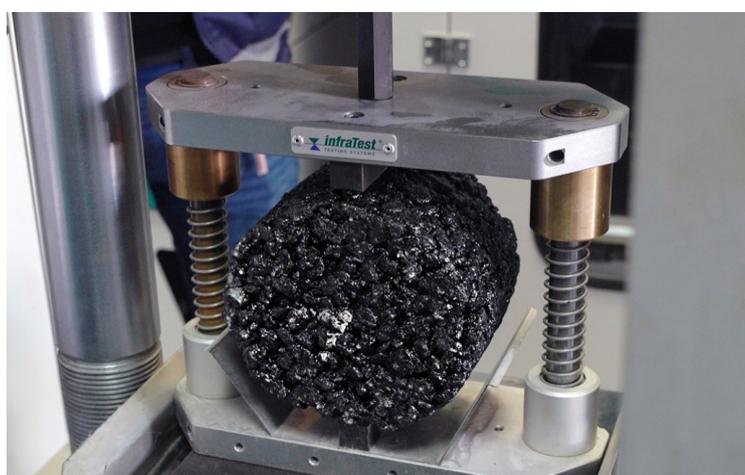


Рис.1. Определение предела прочности при непрямом растяжении. (иллюстрация авторов)

Fig.1 Determination of indirect tensile strength (illustration by the authors)

Водостойкость асфальтобетона в соответствии с ГОСТ Р 58401.1-2019 должна быть не менее 0,80.

На последнем этапе исследований оценивалась склонность подобранных асфальтобетонов к образованию колеи пластичности, которую определяли на установке Omiereur Pavement Rutting Tester. Размер плиты составил 600×400 мм.

Приготовление образцов-плит осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 58406.4. С этой целью для каждого состава формовалось по две плиты. Согласно ГОСТ 58401.13 плиты перед испытанием выдерживались в помещении лаборатории при температуре  $22 \pm 3^\circ\text{C}$  в течении суток.

После первых десяти циклов нагрузки фиксировали первоначальное показание вертикального положения колеса. Далее в течении первого часа испытания показания фиксировали еще 20 раз, а затем фиксацию проводили каждые 500 циклов нагрузки. Вертикальное положение колеса определяют, как среднеарифметическое значение высот в 25 равномерно распределенных точках по оси движения колеса на расстоянии по  $(50 \pm 2)$  мм в разные стороны от геометрического центра поверхности испытуемого образца, измерения проводили без остановки, в течении 10 000 циклов нагрузки (20 000 прокатываний колеса). Температура испытания в камере установки составляла 60°C. Средняя глубина колеи определялась как среднеарифметическое значение глубины колеи двух испытуемых образцов, измерения проводились с точностью до 0,1 мм. Пропорциональную глубину колеи PRD, %, вычисляли по формуле:

$$PRD = RD h \cdot 100, \quad (3)$$

где RD – глубина колеи при определенном количестве прокатываний, мм;

h – фактическая толщина испытуемого образца, мм.

Значение пропорциональной глубины колеи записывали с точностью до 0,1 %. За результат испытания принимается среднеарифметическое значение пропорциональной глубины колеи двух испытуемых образцов.

Угол наклона кривой колееобразования WTS, мм/1000 циклов, вычисляется по формуле:

$$WTS = d10\ 000 - d5000 \cdot 5, \quad (4)$$

где d10 000 – глубина колеи после 10000 циклов нагружения, мм;

d5000 – глубина колеи после 5000 циклов нагружения, мм.

Значение угла наклона кривой колееобразования фиксировалось с точностью до 0,01 мм. Результатом считается среднеарифметическое значение угла наклона кривой колееобразования двух образцов.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты испытания запроектированных асфальтобетонов на определение предела прочности при непрямом растяжении на водостойкость приведены в таблице 5

Таблица 5

Определение предела прочности при непрямом растяжении асфальтобетонов

	SP-16	A16BH	Б марки I
S1	3,197	3,080	2,560
S2	3,457	3,357	3,171
TSR	0,96	0,93	0,79

Как видно из полученных результатов водостойкость асфальтобетона SP-16 на 3 % выше чем у асфальтобетона A16BH и почти на 18 % выше чем у асфальтобетона типа Б марки I.

Были проведены испытания образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности для асфальтобетонов SP-16, A16BH и типа Б марки I. На основе испытаний были составлены графики испытаний:

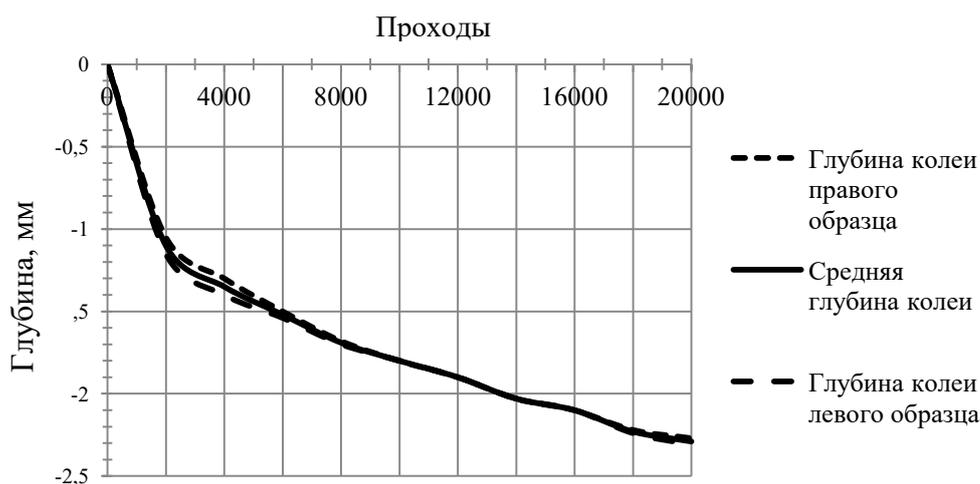


Рис.2. Испытание на образование колеи пластичности для SP-16 (иллюстрация авторов)  
 Fig.2 Plasticity Rutting Test for SP-16 (illustration by the authors)

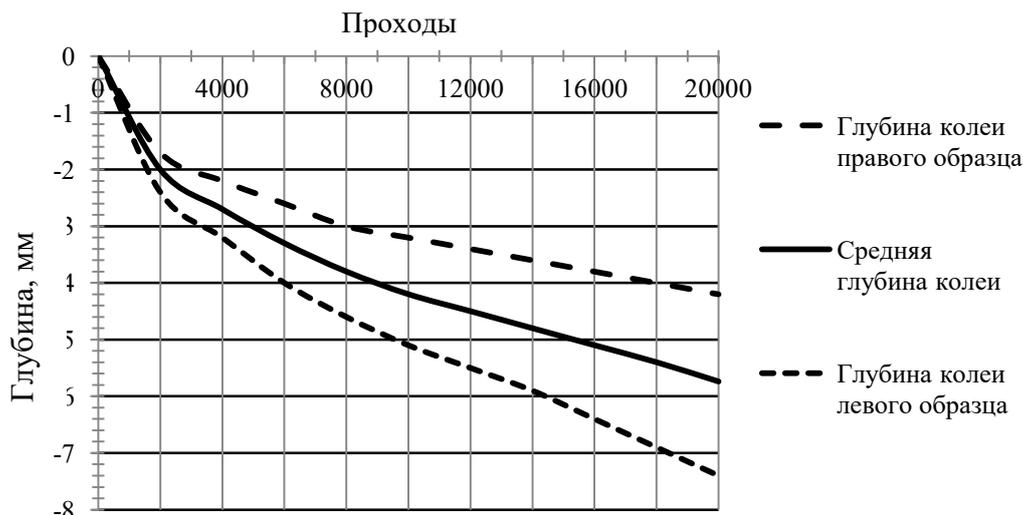


Рис.3. Испытание на образование колеи пластичности для А16ВН (иллюстрация авторов)  
 Fig.3 Plasticity rutting test for A16VN (illustration by the authors)

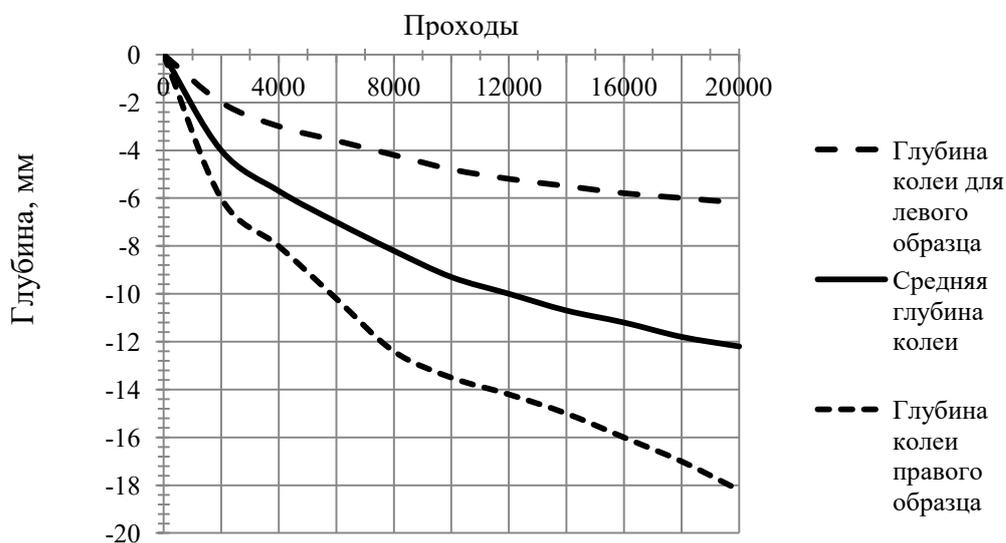


Рис.4. Испытание на образование колеи пластичности для типа Б марки I (иллюстрация авторов)  
 Fig. 4 Plasticity Rutting Test for Type B Grade I (illustration by the authors)

Проведен сравнительный анализ полученных образцов на склонность к образованию колеи пластичности и сведен в таблицу 6.

Таблица 6

Сравнение образцов на склонность к образованию колеи пластичности.

Наименование	SP-16 (ГОСТ Р 58401.1-2019)	A16ВН (ГОСТ Р 58406.2-2020)	Тип Б марки I (ГОСТ 9128-2013)
Глубина колеи по нормативу, мм	2,50	6,0	Не нормируется
Полученная колея, мм	2,29	5,74	12,22
Износ, %	4,6	11,48	24,44
Изменение колеи для SP-16 и A16ВН от типа Б марки I	+19,84	+12,96	

По проведенным испытаниям было выполнено сравнение асфальтобетонов SP-16, А16ВН и Типа Б Марки I.

Таблица 7

## Сравнение испытаний полученных асфальтобетонов

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	SP-16	А16ВН	Тип Б марки I
1	2	3	4	5	6
1	Объемная плотность образцов	г/см <sup>3</sup>	2,508	2,520	2,550
2	Максимальная плотность смеси	г/см <sup>3</sup>	2,552	2,637	2,638
3	Содержание воздушных пустот	%	3,9	4,5	1,7
4	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)	%	13,7	13,3	12,9
5	Пустоты наполненные битумом (ПНБ)	%	74	74	76,6
6	Отношение пыль вяжущее		0,8	1,47	1,4
7	Содержание битумного вяжущего	%	4,9	5,3	5,4
8	Глубина колеи	мм	2,29	5,74	12,22

Из полученных данных видим, что прочностные характеристики и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I уступает асфальтобетонам SP-16, А16ВН.

### Заключение

Были проведены испытания по определению зернового состава асфальтобетонов объемными методами проектирования по (ГОСТ Р 58401.1-2019, ГОСТ Р 58406.2-2020) SP-16, А16ВН и методом предельных кривых по (ГОСТ 9128-2013) тип Б Марки I.

Были проведены экспериментальные исследования с целью изучения физико-механических свойств асфальтобетонов SP-16, А16ВН и тип Б Марки I.

Были проведены испытания запроецированных асфальтобетонов на определение предела прочности при непрямом растяжении на водостойкость.

Результаты испытаний показали, что коэффициент водостойкости для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативным параметров и составляет для SP-16(0,96%), для А16ВН (0,93%). Для асфальтобетона Тип Б марки I коэффициент водостойкости составляет (0,79%). Водостойкость асфальтобетона в соответствии с ГОСТ Р 58401.1-2019 должна быть не менее 0,80%.

Были проведены испытания образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности для асфальтобетонов SP-16, А16ВН и типа Б марки I.

Результаты испытаний показали, что глубина колеи для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативных документов и составляет для SP-16 (2,29мм.), для А16ВН (5,74мм.), а для асфальтобетона Тип Б марки I составляет (12,22мм.)

Из полученных данных видим, что прочностные характеристики и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I уступает асфальтобетонам SP-16, А16ВН.

### Список литературы

1. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges. 2017. Vol.15. No 4. P. 271–284. DOI: 10.7409/rabdim.016.017
2. Смирнов Д.С., Лобанова А.С. Исследование пластического колееобразования дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона в Республике Татарстан // Техника и технология транспорта. 2019. Т. 5. Вып. 11. С.38. [Smirnov

- D.S., Lobanova A.S. Investigation of plastic rutting of road surfaces made of crushed-mastic asphalt concrete in the Republic of Tatarstan // *Technique and technology of transport*. 2019. Vol. 5. Issue 11. P. 38.]
3. Коротков Ю.М., Богомолов С.В. Оценка характеристик сдвигоустойчивости крупнозернистых щебеночно-мастичных асфальтобетонов: сб. материалов X всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». 2018. С. 42302.1-42302.4.[ Korotkov Yu.M., Bogomolov S.V. Assessment of shear stability characteristics of coarse-grained crushed-mastic asphalt concrete: collection of materials of the X All-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia". 2018. P. 42302.1-42302.4]
  4. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. Т.4. С. 158-170.[ Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Harutyunyan E.R. Mathematical modeling of shear stability of asphalt concrete pavements // *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017. Vol.4. P. 158-170.]
  5. Kandhal P. S. and I. Rickards. Premature Failure of Asphalt Overlays from StriPing: Case Histories // *Asphalt Paving Technology*. 2001. Vol. 70. P. 1–33.
  6. Linbing Wang, Hongren Gong, Yue Hou, Xiang Shu, Baoshan Huang *Advances in Pavement materials, design, characterisation, and simulation // Road Materials and Pavement Design*. 2017 Vol.18. No. S3 P. 1-11. DOI: 10.1080/14680629.2017.1329856
  7. А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин Анализ причин колеобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления // *Вестник СибАДИ*. 2019. Т. 16. Вып.6. С.718–745.[ A.S. Alexandrov, T.V. Semenova, A.L.Kalinin Analysis of the causes of rutting on flexible pavements and recommendations for reducing this phenomenon // *Bulletin of SibADI*. 2019. Vol. 16. Issue 6. P. 718–745.]
  8. Li, Jiange & Sha, Aimin & Jiang, Wei & Ren, Xueyuan Investigation on internal mechanical response of asphalt mixture during creep test utilizing the Smart Aggregate// *Construction and Building Materials*. 2022 Vol.349. No. 1 P. 1-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128800
  9. Журавлев И.Н. Вопросы влияния повышенных динамических нагрузок на состояние дорожных одежд // *Colloquium-journal*. 2019. Т. 22. Вып. 46. С. 50-53. [Zhuravlev I.N. Questions of the influence of increased dynamic loads on the condition of pavements// *Colloquium-journal*. 2019. Vol. 22. Issue 46. P. 50-53.]
  10. Chen, D., Ling, J., Li, D., & Zheng, C. Monitoring and evaluating techniques of highway subgrade safety in the operation period // *Road Materials and Pavement Design*. 2017 Vol.18. No. S3 P. 215-225. DOI: 10.1080/14680629.2017.1329876
  11. Vysotskaya M., Vdovin E., Kuznetsov D., Shiryayev A. Alternative mineral powders for asphalt concrete // II International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2021). 2021. Vol. 169. P. 297-307. doi: 10.1007/978-3-030-80103-8\_32.
  12. Навольный А.С., Чернов С.А. Пути подборов составов мелкозернистых асфальтобетонных смесей, наиболее устойчивых к процессам колеобразования // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. Вып. 1. С.1. DOI: 10.15862/01SATS118.[ Navolny A.S., Chernov S.A. Ways of selecting compositions of fine-grained asphalt concrete mixtures that are most resistant to the processes of rutting formation // *Online magazine "Transport facilities"*. 2018. Vol. 5. Issue 1. P.1. DOI: 10.15862/01SATS118]
  13. Павлова Л.Н., Зайнутдинов В.В. Асфальтобетонные смеси «SUPERPAVE» // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн*. 2023. Т. 6. Вып. 111. С. 60-62. [Pavlova L.N., Zaynutdinov V.V. Asphalt concrete mixtures "SUPERPAVE" // *Universum: technical sciences: electron. scientific. journal*. 2023. Vol. 6. Issue 111. P. 60-62.]

14. Веюков Е.В., Салихов М.Г., Толстова А.Г., Тихвинская Д.П. Проектирование дорожных одежд с учетом процессов старения асфальтобетонов // Инвестиции и инновации. 2022. Т. 4. С.191-195. [Veyukov E.V., Salikhov M.G., Tolstova A.G., Tikhvinskaya D.P. Designing Road structural layers taking into account the aging processes of asphalt concrete // Investments and innovations. 2022. Vol. 4. p.191-195.]
15. Кочнев В.И., Котлярский Э.В. Оптимизация проектирования состава асфальтобетона: сб. ст. Научные технологии и инновации / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 44-48. [Kochnev V.I., Kotlyarsky E.V. Optimization of asphalt concrete composition design: collection of high-tech technologies and innovations / Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2014. P. 44-48.]
16. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2019. Вып. 3. С.8-12.[ Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology // Bulletin of VG. Shukhov BSTU 2019. Issue 3. P.8-12.]

#### Информация об авторах

**Смирнов Денис Сергеевич**, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: denis27111974@yandex.ru

**Белаева Камиля Равиловна**, лаборант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: belaeva.kam@gmail.com

**Хохряков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

#### Information about the authors

**Denis S. Smirnov**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russian Federation.

Email: Denis27111974@yandex.ru

**Kamilya R. Belaeva**, laboratory assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russian Federation.

Email: belaeva.kam@gmail.com

**Oleg V. Khokhryakov**, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ninamor@mail.ru