

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS124.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS124 (<https://doi.org/10.15862/04SATS124>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Экспериментальные исследования модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд

Косенко Н.В., Горячев М.Г., Дмитриев С.М., Яркин С.В.

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Косенко Наталья Валерьевна, e-mail: m.nat-93@mail.ru

Аннотация. За последние годы в Российской Федерации произошло значительное расширение ассортимента дорожных материалов, применяемых на автомобильных дорогах. Однако, наблюдается отсутствие гармонизации новых асфальтобетонов, западноевропейского формата, с нормативными документами на проектирование нежестких дорожных покрытий, в части назначения их расчетных характеристик. В связи с этим возникает необходимость в определении и обосновании численных значений механических показателей новых асфальтобетонов, применяемых для проектирования нежестких дорожных одежд при проверке на прочность.

Авторы статьи в предыдущих публикациях представили новый графо-аналитический подход по обоснованию расчетных модулей упругости асфальтобетонов из ГОСТ Р 58406.2-2020. Настоящая

статья является продолжением данной разработки и включает в себя результаты эмпирической проверки достоверности аналитического метода. Были проведены испытания по определению статического лабораторного модуля упругости асфальтобетона при одноосном изгибающем нагружении образцов-балочек некоторых типов асфальтобетона из ГОСТ Р 58406.2 и, максимально соответствующих им, из ГОСТ 9128. К полученным, в ходе эксперимента значениям, был применен расчетный метод, разработанный авторами ранее. В статье представлено исследование, которое направлено на экспериментальное подтверждение аналитически обоснованных расчетных значений модулей упругости асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2021 для проектирования дорожных одежд.

Ключевые слова: асфальтобетон; модуль упругости; расчетные характеристики; лабораторные исследования; проектирование дорожных одежд

Investigational studies of asphalt concrete elastic moduli for pavement design

Natalya V. Kosenko, Mikhail G. Goryachev, Sergei M. Dmitriev, Sergei V. Yarkin

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Corresponding author: Natalya V. Kosenko, e-mail: m.nat-93@mail.ru

Abstract. In recent years in the Russian Federation there has been a significant expansion of road materials variety used on highways. However, there is a lack of harmonization of new asphalt concrete of Western European format, with regulatory documents for the non-rigid pavement design, in terms of their design characteristics assignment. In this regard, there is a need to determine and justify the numerical values of the new asphalt concrete mechanical performance used for the non-rigid pavement design when tested for strength.

In previous publications authors have presented a new graph-analytical approach to justify the elasticity design moduli of asphalt concrete from GOST R 58406.2-2020. This paper is a continuation of that development and includes the empirical verification results of the analytical

method accuracy. Tests were carried out to determine the static laboratory elasticity modulus of asphalt concrete under uniaxial bending loading of bar specimens of some asphalt concrete types from GOST R 58406.2 and best corresponding ones from GOST 9128. To the values obtained, during the experiment, the calculation method developed by the authors earlier was applied. The article presents a study aimed at experimental confirmation of analytically justified calculated values of asphalt concrete elastic moduli according to GOST R 58406.2-2021 for the pavement design.

Keywords: asphalt concrete; modulus of elasticity; design characteristics; laboratory research; pavement design

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Состояние дорожного покрытия играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективной работы автомобильных дорог. В настоящее время асфальтобетон широко используется в качестве основного материала для верхних слоев дорожной одежды. Отечественные ученые прошлого века, опираясь на научные исследования и практический опыт, разработали теоретические концепции и методы применения асфальтобетона, учитывая опыт ведущих промышленных стран.

В современной эпохе наблюдается повышенный интерес научного сообщества к увеличению срока службы асфальтобетона в составе дорожного покрытия. Обновление государственных стандартов по нормированию строительных материалов и проектированию дорожных конструкций также способствует повышению работоспособности дорог.

Постепенное внедрение зарубежных методик проектирования асфальтобетонов в отечественную дорожную отрасль требует их адаптации к местным условиям производства. Вопросы и критика относительно расчетных характеристик новых асфальтобетонов для дорожного покрытия вызывают серьезное обсуждение. Глубокие системные исследования требуют значительных временных и финансовых затрат, что не всегда соответствует современным требованиям дорожного строительства.

В настоящее время идет процесс обоснования расчетных значений для асфальтобетонов из ГОСТ Р 58406.2-2021, применяемых для проектирования нежестких дорожных одежд. В «Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете» (МАДИ) активно занимаются процессом обоснования расчетных значений для новых асфальтобетонов. В рамках диссертационного исследования, специалисты проводят комплексные исследования, которые включают аналитический подход и экспериментальную составляющую. В рамках этой работы уже была опубликована первая часть исследований, где предлагается метод определения расчетных модулей упругости, путём графо-аналитического алгоритма, основанного на сопоставлении новых материалов, из нормативного документа европейского формата, с, хорошо изученными, традиционными асфальтобетонами из ГОСТ 9128-2013 [1; 2]. Данной темой по гармонизации асфальтобетонов с методикой проектирования нежестких дорожных одежд озадачены и другие специалисты [3; 4].

Суть данной работы эмпирическим путём подтвердить или опровергнуть достоверность аналитического метода по определению моделей упругости, суть эксперимента состоит в получении статических модулей упругости при одноосном трехточечном изгибающим нагружении образцов-балочек из асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2 и, максимально соответствующих им, асфальтобетонов из ГОСТ 9128.

Метод определения статического модуля упругости асфальтобетона

Method for determining the asphalt concrete static elasticity modulus

Используемый в данной работе способ по определению модуля упругости (Юнга) лежит в основе многочисленных исследований как отечественных¹ [5], так и зарубежных авторов [6–8] и соответствует методике, отраженной в действующем нормативном документе республики Беларусь «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний» СТБ 1115-2013.² В процессе механических испытаний образец асфальтобетона подвергается упругой и пластической деформации с последующим разрушением. При любых механических испытаниях лабораторные образцы проходят упругую стадию деформации, что обуславливается законом Гука, а связь между напряжением и деформацией, в этом случае, характеризует модуль упругости, то есть показатель, который лежит в основе данного исследования. Механизм упругой деформации асфальтобетона под воздействием внешних нагрузок заключается в том, что при приложении нагрузки образец деформируется, связи между атомами подвергаются растяжению и сжатию, однако внутренние их структуры сохраняются. Упругий режим деформации позволяет материалу возвращаться к своему исходному состоянию после удаления нагрузки, благодаря восстанавливающей силе внутренних связей.

При приложении динамических нагрузок модуль упругости всегда выше, чем при тех же нагрузках, но действующих статически. Это объясняется тем, что при кратковременном нагружении за модуль упругости, по большей части, отвечает минеральная составляющая, а при увеличении длительности нагружения в процесс упругой деформации подключается вяжущее, содержание которого около 5 % в составах асфальтобетонов [9]. Даже в рамках одного и того же типа асфальтобетона,

¹ Руденский, А.В. Исследование влияния пластичности на деформативные и прочностные характеристики асфальтобетона: дисс. ... канд. техн. наук. — М., 1965. — 168 с.

² Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115-2013. Введ. 07.01.2014. Минск: БелдорНИИ: Госстандарт Беларуси, 2014. — 39 с.

значимое влияние на получаемые прочностные показатели в т. ч. и на модуль упругости оказывают время приложения нагрузки³ [10; 11], изменение минеральной составляющей [12; 13] или вязких свойств битума [14; 15]. Поэтому для гарантирования сопоставимости и последовательности результатов при проведении исследований соблюдались следующие условия:

- геометрические параметры (форма и размеры образца);
- механические факторы (схема и скорость нагружения) [16];
- физические условия (температура образца в момент испытания);
- идентичный состав балочек для одного типа асфальтобетона.

По итогам проведённых лабораторных испытаний образцов асфальтобетона в виде призм с монитора испытательной машины считываются соседние пары значений «усилие-деформация» в упругой линейной прямой, где возникают вертикальные смещения тела, основанные на справедливости закона Гука. Далее производятся вычисления, описанные ниже.

Изменение нагрузки ΔP_i определяется как разница между максимальным и минимальным значением в паре усилия на линейной прямой графика «усилие-деформация»:

$$\Delta P_i = (P_{i+1} - P_i), \quad (1)$$

где P_{i+1} — максимальное значение усилия в паре значений «усилие — деформация», Н; P_i — минимальное значение усилия в паре значений «усилие — деформация», Н.

Разность отсчетов вертикальной деформации Δf_{cp} на линейной прямой графика «усилие-деформация» определяют по формуле:

$$\Delta f_i = \Delta f_{i+1} - \Delta f_i, \quad (2)$$

где Δf_{i+1} — максимальное значение деформации в паре значений «усилие — деформация», Н; Δf_i — минимальное значение, Н.

Следующим шагом идёт вычисление среднеарифметического значения результатов определений изменения нагрузки ΔP_{cp} и изменения деформации Δf_{cp} в соседний парах значений «усилие-деформация» и так для каждой партии образцов-призм при заданной температуре.

³ Золотарев, В.А. Влияние температуры и времени на прочность асфальтобетона / В.А. Золотарев, Д.И. Садовенко // Сборник научных трудов № 19. — Хабаров. политехн. Инт., 1969. — с. 46–52.

В связи с тем, что образец асфальтобетона, при данном методе нагружения, сминается в местах касания с нижней опорой прессы, что не должно отражаться в значении модуля упругости, необходимо замерить данную величину и определить полную линейную деформацию нагружаемого образца.

Полную линейную деформацию Δf вычисляют по формуле:

$$\Delta f = \Delta f_{cp} - \Delta f_{cm}, \quad (3)$$

где Δf_{cp} — средняя линейная деформация образца-призмы в соседних парах значений «усилие-деформация», см; Δf_{cm} — линейная деформация смятия образца-призмы, см.

Искомое значение модуля упругости E , МПа, вычисляют по формуле:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad (4)$$

где $\Delta \sigma$ — изменение предела напряжения, Па; $\Delta \varepsilon$ — изменение относительной деформации.

Напряжение, возникающее на поверхности материала при изгибе, для образца равномерного прямоугольного сечения, определяется по формуле:

$$\Delta \sigma = \frac{M_{изг}}{S}, \text{ Па}, \quad (5)$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент; S — момент сопротивления сечения балочки.

Влияние геометрии поперечного сечения на распределение напряжений учитывается, так называемым, моментом инерции I по площади. Для прямоугольного поперечного сечения момент инерции зависит только от высоты и ширины, испытываемого образца. Следовательно, момент сопротивления сечения балочки определяется по формуле:

$$S = \frac{2I}{h} = \frac{2}{h} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{bh^2}{6}, \quad (6)$$

где I — момент инерции поперечного сечения образца; l — расстояние между опорами, мм; b — ширина образца-призмы, мм; h — высота образца-призмы, мм.

Для определения изгибающего момента в точке максимального прогиба необходимо обратить внимание на процесс проведения нагружения. Испытание на изгиб образца-призмы из асфальтобетона предполагает трехточечное нагружение, то есть расположение силы равноудаленно от опор, значит каждая из двух опор поглощает половину изгибающего усилия (рис. 10).

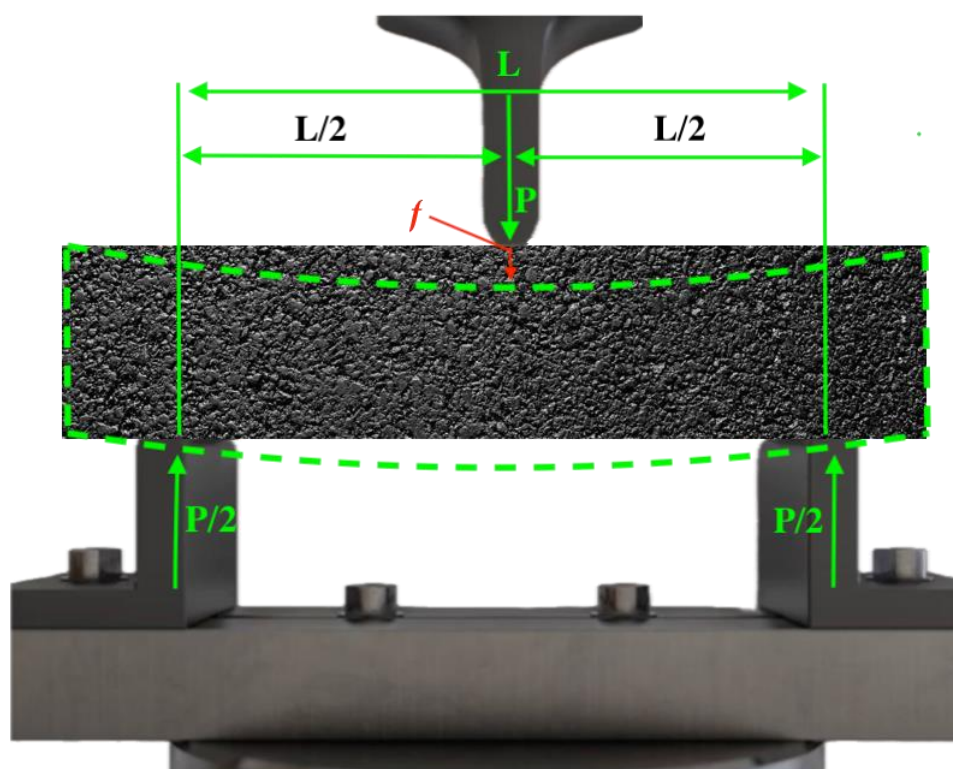


Рисунок 1. Схематичная демонстрация процесса нагружения образца-призмы (разработано авторами)

Figure 1. Schematic loading process demonstration of the prism specimen (developed by the authors)

В нашем случае максимальный изгибающий момент при одиночной нагрузке, которая расположена симметрично относительно опор, определяется по формуле:

$$M_{\text{изг}} = \frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{Pl}{4}. \quad (7)$$

Исходя из изложенного выше находим изменение предела напряжения $\Delta\sigma$ при фиксированном изменении вертикального перемещения Δf в упругой стадии, по формуле:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P_{\text{ср}} l}{4} \cdot \frac{6}{bh^2} = \frac{3\Delta P_{\text{ср}} l}{2bh^2}, \text{ Па.} \quad (8)$$

Относительная деформация при изгибе балочки имеет следующую зависимость:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E}. \quad (9)$$

Для вычисления относительной деформации модуль упругости можно выразить на основе изгибающего момента и результирующего прогиба следующим образом:

$$E = \frac{M \cdot L^2}{12 \cdot \Delta f \cdot I}. \quad (10)$$

Внешний изгибающий момент вызывает линейное распределение напряжений в образце асфальтобетона по поперечному сечению (рис. 2). При статическом равновесии распределение внутренних напряжений, в свою очередь, создает крутящий момент, который уравнивает внешний изгибающий момент. Используя это равновесие и предполагая линейное распределение напряжений, можно установить равновесие между действующим изгибающим моментом и напряжением, возникающим на расстоянии от поверхности образца до нейтральной оси.

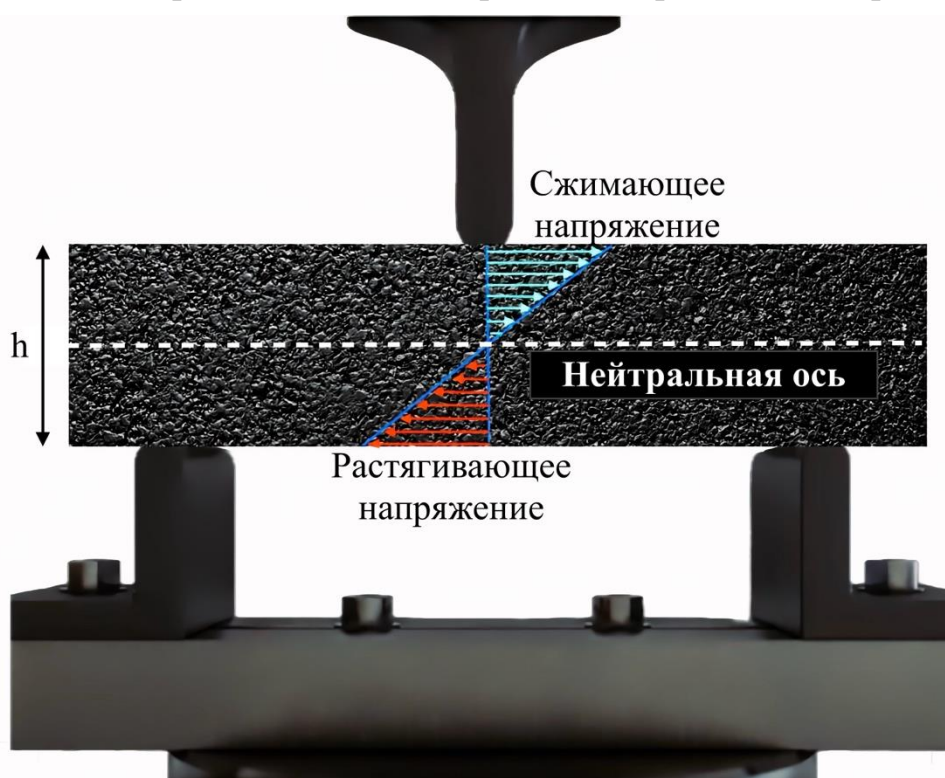


Рисунок 2. Схематичная демонстрация распределения напряжений в упругой стадии, образующиеся в образце асфальтобетона при нагружении (разработано авторами)

Figure 2. Schematic demonstration of elastic stage stress distribution formed in an asphalt concrete sample under loading (developed by the authors)

Напряжение, возникающее в образце асфальтобетона при изгибе, в стадии линейного равновесия, исходя из формул (5) и (6) определяется следующим образом:

$$\Delta\sigma = \frac{M}{S} = \frac{M}{\frac{2 \cdot I}{h}} = \frac{Mh}{2I}. \quad (11)$$

Относительную деформацию образца-балочки в линейной стадии, упрощая, приводят к следующему выражению:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{M \cdot h \cdot 12 \cdot \Delta f \cdot I}{2 \cdot I \cdot M \cdot L^2} = \frac{6 \Delta f h}{L^2}. \quad (12)$$

Результаты

Results

Для исследования был выбран асфальтобетон А22От. Ранее выявлены типы асфальтобетонов из ГОСТ 9128, которые максимально соответствуют асфальтобетону А22От из ГОСТ 58406.2-2020 (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Типы асфальтобетона из ГОСТ 9128-2013 максимально соответствующие асфальтобетону А22От из ГОСТ Р 58406.2-2020

Types of asphalt concrete from GOST 9128-2013 best corresponding to А22От asphalt concrete from GOST R 58406.2-2020

«Части соответствия» асфальтобетонных смесей из ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетонной смеси из ГОСТ Р 58406.2-2020 А22От «Corresponding parts» of asphalt concrete mixtures from GOST 9128-2013 for asphalt concrete mixture from GOST R 58406.2-2020 А22От		
КЗ тип А Coarse-grain mix type A	КЗ тип Б Coarse-grain mix type B	КЗ пористый Coarse-grain mix porous
0,37	0,37	0,26

Разработано авторами / Developed by the authors

Определение лабораторного модуля упругости производилось на электромеханическом испытательном прессе ДТС-06-50-50, при помощи специальной насадки, которая способна создавать изгибающую нагрузку (рис. 3).



1 — подвижная опора с нагрузочным роликом; 2 — нижняя неподвижная опора с двумя роликами, на которые устанавливается образец-призма из асфальтобетона

1 — movable support with a loading roller; 2 — lower fixed support with two rollers on which a asphalt concrete prism specimen is installed

Рисунок 3. Приспособление для определения предела прочности на растяжение при изгибе и показателей деформативности (разработано авторами)

Figure 3. Device for determining the tensile strength in bending and deformability indicators (developed by the authors)

После физического испытания образца-призмы, на экран испытательного устройства был выведен график отношения «усилие-деформация» (рис. 4). Соседние пары значений «усилие-деформация» в упругой линейной прямой сведены в табличную форму (табл. 2). Ниже приведен пример получения лабораторного модуля упругости асфальтобетона по ГОСТ Р 58406.2-2021 А22От при температуре испытания +10°C.

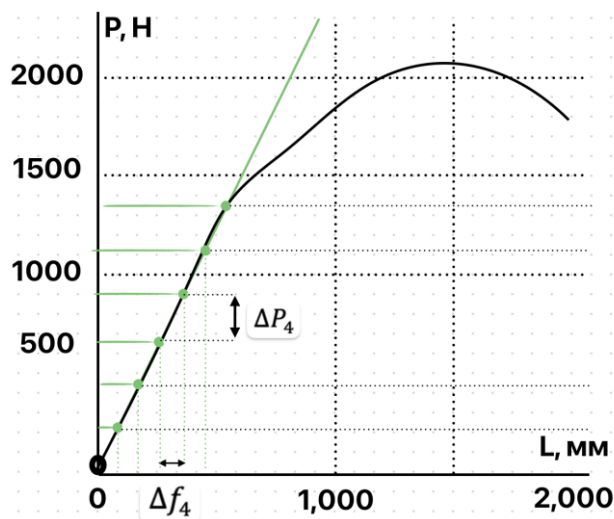


Рисунок 4. График отношения «усилие-деформация» в результате проведённого испытания образца-призмы из асфальтобетона А22От на прессе ДТС-06-50-100 (разработано автором)

Figure 4. Ratio chart of the «force-deformation» relation as a result of the prism specimen test made of asphalt concrete А22От on the press DTS-06-50-100 (developed by the author)

Таблица 2 / Table 2

Соседние пары значений «усилие-деформация» в упругой линейной прямой для асфальтобетона А22От при температуре испытания +10°C

Neighbor paired «force-strain» values in the elastic linear straight line for А22От asphalt concrete at test temperature +10°C

Нагрузка, Н Load, H	Вертикальная деформация, мм Vertical strain, mm	Разность отсчетов вертикальной деформации, мм Difference of vertical strain readings, mm
225	0,105	-
450	0,210	0,105
675	0,316	0,106
900	0,421	0,105
1 125	0,526	0,105
1 350	0,632	0,106
$\Delta P_{cp} = 225$	$\Delta f_{cp} = 0,105$	

Разработано авторами / Developed by the authors

Полную линейную деформацию Δf вычисляют по формуле (3):

$$\Delta f = 0,0105 - 0,00075 = 0,0105 \text{ см.}$$

По формуле (8) вычисляем изменение напряжения $\Delta \sigma, \frac{H}{\text{см}^2}$:

$$\Delta\sigma = \frac{3\Delta P_{cp}l}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 225 \cdot 14}{2 \cdot 4 \cdot 4,1^2} = 70,271, \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}.$$

Изменение относительной деформации $\Delta\varepsilon$, см, вычисляют по формуле (12):

$$\Delta\varepsilon = \frac{6\Delta fh}{l^2} = \frac{6 \cdot 0,0105 \cdot 4,1}{14^2} = 0,0013, \text{ см.}$$

Лабораторный модуль упругости E , Па, с округлением до целого числа вычисляют по формуле (4):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{70,271}{0,0013} = 53\,449 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2} = 5\,345 \text{ Па} \cdot 10^5 = 535, \text{ МПа.}$$

Аналогичным способом вычисления проводятся для каждого образца-призмы, полученные значения для асфальтобетона А22От, при температуре испытания $+10^\circ\text{C}$, указаны ниже (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Значения среднего лабораторного модуля упругости
образца-призмы асфальтобетона по ГОСТ Р 58406.2-2021 А22От
(при температуре испытания $+10^\circ\text{C}$)**

**Average laboratory modulus values of prism specimen elasticity of asphalt
concrete according to GOST R 58406.2-2021 A22Ot (at test temperature $+10^\circ\text{C}$)**

№ образца <i>No. of sample</i>	Изменения нагрузки в смежных точках ΔP , Н <i>Load changes in adjacent points ΔP, N</i>	Полная линейная деформация Δf , мм <i>Total linear strain Δf, mm</i>	Лабораторный модуль упругости E , Па $\cdot 10^5$ <i>Laboratory elastic modulus E, Pa$\cdot 10^5$</i>	Средний лабораторный модуль упругости E , МПа <i>Average laboratory elastic modulus E, MPa</i>
1	210	0,105	5 016	513
2	211	0,105	5 036	
3	225	0,105	5 345	

Разработано авторами / Developed by the authors

Полученные значения лабораторных модулей упругости испытанных асфальтобетонов, при разных температурных режимах испытаний, указаны ниже (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Значения лабораторных модулей упругости
Laboratory elastic modulus values**

Тип асфальтобетона <i>Asphalt concrete type</i>	А22От <i>A22Om</i>	КЗпор <i>Coarse-grain mix porous</i>	КЗА <i>Coarse-grain mix A</i>	КЗБ <i>Coarse-grain mix B</i>
Температура испытания, с <i>Test temperature, s</i>	Модули упругости, Па $\cdot 10^5$ <i>Elastic moduli, Pa$\cdot 10^5$</i>			
+10	5 133	2 185	5 465	5 472
+20	3 396	2 499	4 290	4 031
+30	965	635	1 338	1 262
+40	496	390	519	430
+50	223	78	240	228

Разработано авторами / Developed by the authors

Используя установленные «части соответствия» асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ 9128-2013, а также лабораторные модули упругости асфальтобетонов по ГОСТ 9128-2013, определяем приведённый лабораторный модуль упругости $E_{прив.}$ дорожного асфальтобетона из ГОСТ Р 58406.2-2020 по следующей формуле [18]:

$$E_{прив.} = n_1 * E_1^O + n_2 * E_2^O + n_3 * E_3^O + \dots + n_n * E_n^O, \quad (14)$$

где n — «части соответствия» для асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ 9128-2013; E^O — лабораторный модуль упругости асфальтобетонов по ГОСТ 9128.

В качестве примера проведем определение приведенного лабораторного модуля упругости для асфальтобетона А22От при +10°C:

$$\begin{aligned} E_{прив.} &= n_1 * E_1^O + n_2 * E_2^O + n_3 * E_3^O + \dots + n_n * E_n^O = \\ &= 0,26 * 2\,185 + 0,37 * 5\,465 + 0,37 * 5\,472 = 4\,615 \text{ Па} * 10^5, \end{aligned}$$

Полученные значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А22От при различных расчетных температурах указаны ниже (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А22От

Absolute and relative error values of asphalt concrete А22От

Температура испытания, °C <i>Test temperature, °C</i>	А22От А22От		Погрешность в абсолютных значениях <i>Error in absolute values</i>	Погрешность в относительная значениях, % <i>Error in relative values, %</i>
	приведённый лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>reduced laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>	лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>		
+10	4 615	5 133	518	10
+20	3 729	3 396	332	9,8
+30	1 127	965	162	16,8
+40	453	496	44	8,8
+50	194	223	30	13,3

Разработано авторами / Developed by the authors

По данной методике также были проведены исследования асфальтобетона А16Вт по ГОСТ Р 58406.2 и мелкозернистого асфальтобетона типа А по ГОСТ 9128.

Значения абсолютной и относительной погрешности для асфальтобетона А16Вт сведены в табличную форму ниже (табл. 6).

Корреляционная зависимость, полученных данных представлена графически (рис. 5).

Таблица 6 / Table 6

Значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А16Вт

Температура испытания, °C <i>Test temperature, °C</i>	А16Вт <i>A16Bm</i>		Погрешность в абсолютных значениях <i>Error in absolute values</i>	Погрешность в относительная значениях, % <i>Error in relative values, %</i>
	приведённый лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>reduced laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>	лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>		
+10	6 548	6 002	546	9,1
+20	3 740	3 589	150	4,2
+30	1 519	1 348	171	12,7
+40	730	627	103	16,5
+50	333	299	34	11,5

Разработано авторами / Developed by the authors

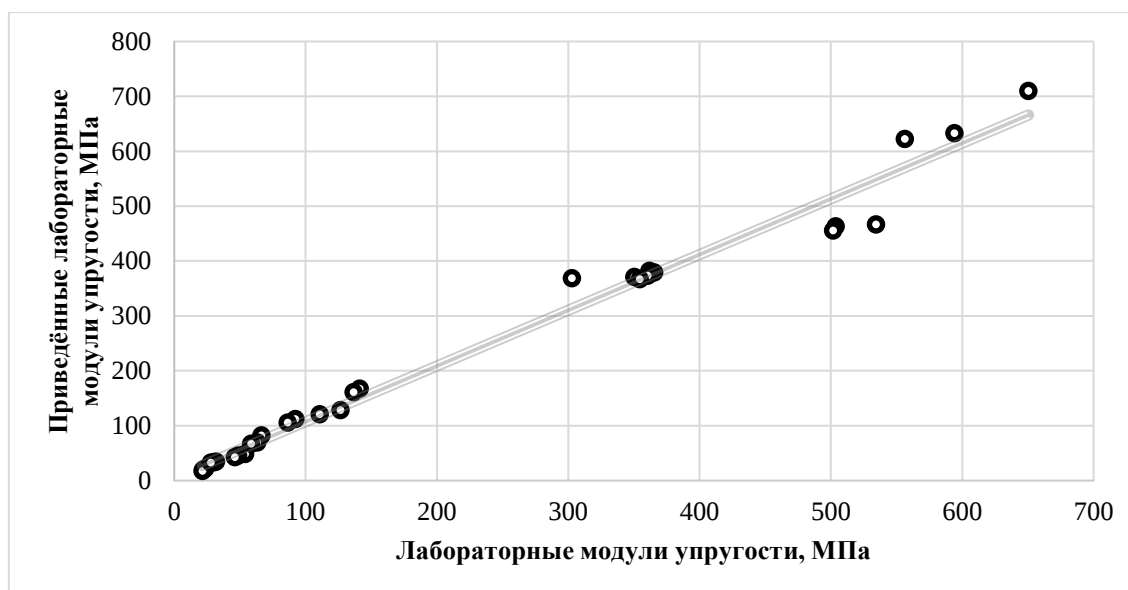


Рисунок 5. Корреляционная зависимость приведенных модулей упругости и лабораторных модулей упругости, полученных при испытаниях на прессе ДТС-06-50-100 (разработано авторами)

Figure 5. Correlation dependence of the reduced elastic modulus and laboratory elastic modulus obtained during tests on the press DTS-06-50-100 (developed by the authors)

На лабораторный модуль упругости при статической методике нагружения большое влияние оказывают вязкостные свойства битума, поэтому важно в рамках одного исследования применять битум одной партии. Полученные значения лабораторных модулей упругости, определённые на одной и той же испытательной машине, последовательны и сопоставимы между собой благодаря соблюдению одинаковых условий по подготовке образцов и проведению механических исследований. Полученные численные значения целесообразно использовать только в рамках данного исследования, они могут отличаться от численных значений, полученных при других условиях и другими исследователями.

Для подтверждения достоверности аналитического метода определения расчетного модуля упругости, была использована вторая

сертифицированная установка — машина испытательная универсальная РЭМ-100-А (рис. 6). Принцип функционирования данной машины основан на преобразовании кинетической энергии, создаваемой сервоприводом, в усилие, прикладываемое к образцу во время испытания. Обработанные цифровые данные передаются на ПК и отображаются на мониторе.



Рисунок 6. Процесс проведения лабораторного испытания по определению расчетных характеристик асфальтобетона на испытательной машине РЭМ-100-А (фото авторов)

Figure 6. Process of laboratory testing to determine the design characteristics of asphalt concrete on the testing machine REM-100-A (photo by the authors)

Для исследования был выбран асфальтобетон А8Вн. Ранее выявлены типы асфальтобетонов из ГОСТ 9128, которые максимально соответствуют асфальтобетону А8Вн из ГОСТ 58406.2-2020 (табл. 7).

Таблица 7 / Table 7

Типы асфальтобетона из ГОСТ 9128-2013 максимально соответствующие асфальтобетону А22От из ГОСТ Р 58406.2-2020

Types of asphalt concrete from GOST 9128-2013 best corresponding to А22От asphalt concrete from GOST R 58406.2-2020

«Части соответствия» асфальтобетонных смесей из ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетонной смеси из ГОСТ Р 58406.2-2020 А8Вн «Corresponding parts» of asphalt concrete mixtures from GOST 9128-2013 for asphalt concrete mixture from GOST R 58406.2-2020 А8Вн	
МЗ тип Б Mineral filling material type B	МЗ тип В Mineral filling material type C
0,52	0,48

Разработано авторами / Developed by the authors

Полученные значения лабораторных модулей упругости испытанных асфальтобетонов указаны ниже (табл. 8).

Таблица 8 / Table 8

Значения лабораторных модулей упругости

Laboratory elastic moduli values

Тип асфальтобетона <i>Asphalt concrete type</i>	A8Bн <i>A8Bn</i>	МЗБ <i>Mineral filling material type B</i>	МЗВ <i>Mineral filling material type C</i>
Температура испытания, с <i>Test temperature, s</i>	Модули упругости, Па·10 ⁵ <i>Elastic moduli, Pa·10⁵</i>		
+10	5 403	6 320	4 289
+20	4 392	4 341	3 179
+30	2 486	2 646	1 968
+40	2 343	2 532	1 458
+50	456	555	407

Разработано авторами / Developed by the authors

Полученные значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А8Вн при различных расчетных температурах указаны выше (табл. 9).

Таблица 9 / Table 9

Значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А8Вн

Absolute and relative error values of asphalt concrete A8Bн

Температура испытания, °С <i>Test temperature, °C</i>	А8Вн <i>A8Bn</i>		Погрешность в абсолютных значениях <i>Error in absolute values</i>	Погрешность в относительных значениях, % <i>Error in relative values, %</i>
	приведённый лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>reduced laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>	лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>		
+10	5 345	5 403	58	1,1
+20	3 783	4 392	609	13,9
+30	2 321	2 486	165	6,7
+40	2 016	2 343	327	13,9
+50	484	456	27	6,0

Разработано авторами / Developed by the authors

По данной методике также были проведены исследования асфальтобетона А16Вт по ГОСТ Р 58406.2 и мелкозернистого асфальтобетона типа А по ГОСТ 9128.

Таблица 10 / Table 10

Значения абсолютной и относительной погрешности асфальтобетона А16Вт

Absolute and relative error values of asphalt concrete A16W

Температура испытания, °С <i>Test temperature, °C</i>	А16Вт <i>A16Wn</i>		Погрешность в абсолютных значениях <i>Error in absolute values</i>	Погрешность в относительных значениях, % <i>Error in relative values, %</i>
	приведённый лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>reduced laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>	лабораторный модуль упругости, Па·10 ⁵ <i>laboratory elastic modulus, Pa·10⁵</i>		
+10	5 890	5 816	74	1,3
+20	4 333	4 179	154	3,7
+30	4 110	3 840	270	7,0
+40	3 186	2 784	402	14,4
+50	369	333	36	10,7

Разработано авторами / Developed by the authors

Значения абсолютной и относительной погрешности для асфальтобетона А16Вт сведены в табличную форму ниже (табл. 10).

Корреляционная зависимость, полученных данных представлена графически (рис. 7).

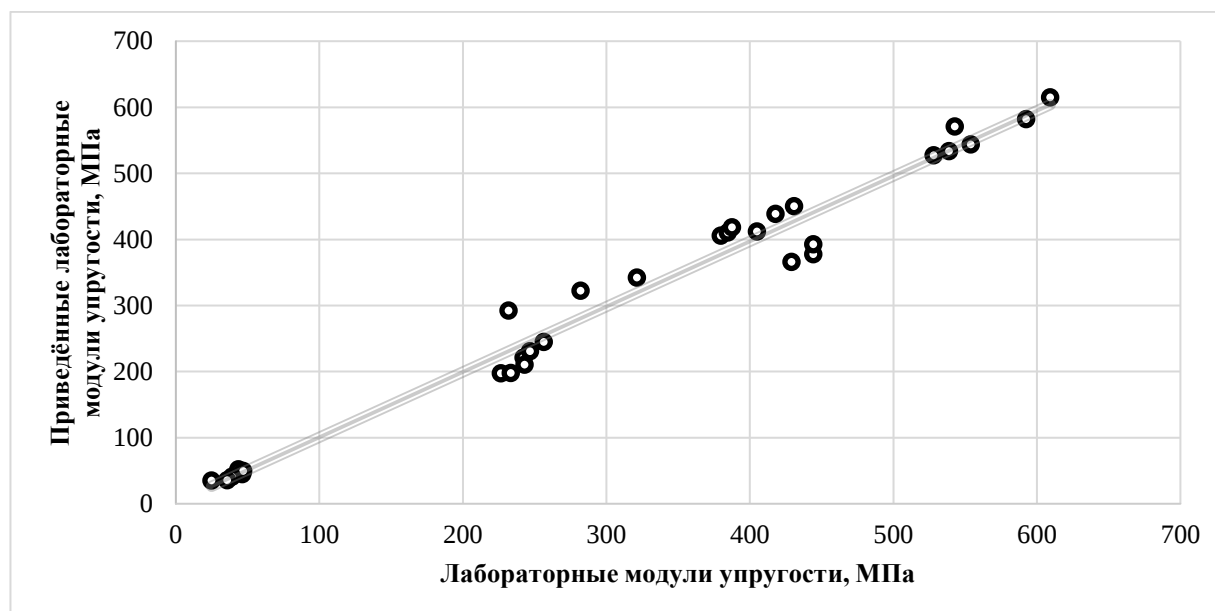


Рисунок 7. Корреляционная зависимость приведенных модулей упругости и лабораторных модулей упругости, полученных при испытаниях на прессе РЭМ-100 (разработано авторами)

Figure 7. Correlation dependence of the reduced elastic modulus and laboratory elastic modulus obtained during tests on the press REM-100 (developed by the authors)

Обсуждение

Discussion

В ходе экспериментальных исследований получены фактические значения статических модулей упругости асфальтобетонов типа А22От; А16Вт; А8Вн из ГОСТ Р 58406.2, а также крупнозернистых асфальтобетонов типа А, Б, Пористого и мелкозернистых типа А, Б и В из ГОСТ 9128. На их основе, используя «части соответствия», определённые ранее расчетно-графическим способом, выведены приведённые лабораторные модули упругости для материалов из ГОСТ 58406.2-202. Полученные численные значения характеризуются высокой степенью однородности.

Изучение новых асфальтобетонов должно быть основано на имеющемся опыте нашей страны и базироваться на тщательно исследованных свойствах и характеристиках отечественных асфальтобетонных материалов, согласно ГОСТ 9128. Проанализировав корреляционную зависимость приведённых и лабораторных модулей упругости, можно сделать вывод, что новая графо-аналитическая методика, по определению

модулей упругости малоизученных асфальтобетонов, основанная на сопоставлении материалов из ГОСТ Р 58406.2-2021 и ГОСТ 9128-2013, позволяет получать достоверные искомые численные значения без необходимости проведения лабораторных исследований, с высокой точностью, что доказано в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Косенко, Н.В.** Обоснование расчетных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 при проектировании дорожных одежд / Н.В. Косенко, М.Г. Горячев // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2022. — № 2. — С. 24–27. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48959807>. — EDN DLNLOK. (дата обращения: 27.02.2024).
2. **Косенко, Н.В.** Система расчётных модулей упругости асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 / Н.В. Косенко, М.Г. Горячев // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2023. — № 3. — С. 32–36. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49473275>. — EDN CHMMAC. (дата обращения: 27.02.2024).
3. Исследование модулей упругости щебеночно-мастичного асфальтобетона для расчета конструкций дорожных одежд / Г.Ф. Кадыров, М.Ю. Горский, К.А. Жданов, Е.Н. Симчук // Дороги и мосты. — 2023. — № 1. — С. 273–297. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54012576>. — EDN KWNTQW. (дата обращения: 27.02.2024).
4. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства / М.Ю. Горский, Г.Ф. Кадыров, А.В. Стрельцов, Е.Н. Симчук // Дороги и мосты. — 2021. — № 2. — С. 53–74. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47340772>. — EDN TPWVZF. (дата обращения: 27.02.2024).
5. **Горелышев, Н.В.** Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы / Н.В. Горелышев. — Москва: Можайск-Терра, 1995. — 176 с.
6. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — пер. с англ. М.И. Рейтмана; под ред. Г.С. Шапиро. — М.: Наука, 1979. — 560 с. — URL: <http://volnogaz.math.msu.ru/pages/books/%D0%A2%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE,%20%D0%93%D1%83%D0%B4%D1%8C%D0%B5%D1%80%20-%20%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F%20%D1%83%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf> (дата обращения: 27.02.2024).
7. Modeling of Asphalt Concrete / под ред. Richard Kim Y. — Нью Йорк: ASCE Press, 2009. — 460 с.
8. **Кириллов, А.М.** Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении / А.М. Кириллов, М.А. Завьялов. — DOI <https://doi.org/10.5862/MCE.54.8> // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 2. — С. 70–76. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23139928>. — EDN TMJQHN. (дата обращения: 27.02.2024).
9. **Кирюхин, Г.Н.** Асфальтобетон для дорожных и аэродромных покрытий: монография / Г.Н. Кирюхин. — 2023. — 181 с. — URL: https://matest.ru/uploads/literature/Asphalt_Concrete.pdf (дата обращения: 27.02.2024).
10. **Кирюхин, Г.Н.** Эффективная модель модуля упругости асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры имени Н. Исанов. — 2016. — № 1. — С. 78–84. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25895658>. — EDN VURNWL. (дата обращения: 27.02.2024).
11. **Lesueur, D.** On the impact of the filler on the complex modulus of asphalt mixtures / D. Lesueur, M. Blázquez, D. Garcia, A. Rubio. — DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1288653> // Road Materials and Pavement Design. — 2017. — Т 19. — № 5. — С. 1057–1071. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2017.1288653>. (дата обращения: 27.02.2024).

12. **Liu, Y.** Review of advances in understanding impacts of mix composition characteristics on asphalt concrete (AC) mechanics / Y. Liu, Z. You, Q. Dai, J. Mills-Beale. — DOI <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575142> // International Journal of Pavement Engineering. — 2011. — Т 12. — № 4. — С. 385–405. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2011.575142>. (дата обращения: 27.02.2024).
13. **Setiawan, A.** Modelling Effect of Aggregate Gradation and Bitumen Content on Marshall Properties of Asphalt Concrete / A. Setiawan, L.B. Suparma, A.T. Mulyono. — DOI <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.2.2084> // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. — 2017. — Т 7. — № 2. — С. 359–65. — URL: <http://ijaseit.insightsociety.org/index.php/ijaseit/article/view/2084>. (дата обращения: 27.02.2024).
14. **Лапченко, А.С.** Взаимосвязь пенетрации вяжущих с модулями упругости асфальтобетонов и асфальтополимербетонов на их основе / А.С. Лапченко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2011. — № 1. — С. 141–146. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44119097>. — EDN QGAFNE. (дата обращения: 27.02.2024).
15. **Md Rashadul, I.** Effect of Loading Rate on the Properties of Asphalt Concrete Using Three-Point Bending Test / I. Md Rashadul, A. Mohiuddin, A.T. Rafiqul. — DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1096.553> // Advanced Materials Research. — 2014. — Т 1096. — С. 553–556. — URL: <https://www.scientific.net/AMR.1096.553>. (дата обращения: 27.02.2024).
16. Обоснование расчётных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 при проектировании дорожных одежд на растяжение при изгибе / Н.В. Косенко, М.Г. Горячев, С.В. Лугов, Д.Ю. Мишина // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. — 2022. — № 2. — С. 4. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49103640>. — EDN ZQGBQT. (дата обращения: 27.02.2024).

Сведения об авторах:

Косенко Наталья Валерьевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, e-mail: m.nat-93@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1129088

Горячев Михаил Геннадьевич — доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, e-mail: kafedra_sed@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302221

Дмитриев Сергей Михайлович — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, e-mail: kafedra_sed@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=868928

Яркин Сергей Васильевич — аспирант, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, e-mail: kafedra_sed@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1053358

Статья получена: 01.03.2024. Принята к публикации: 06.05.2024. Опубликовано онлайн: 20.05.2024.

Авторы выражают благодарность заместителю начальника отдела асфальтобетона и дорожных технологий отраслевой дорожной лаборатории ГП «БелдорНИИ» Кошелеву Д.В. и ведущему эксперту дорожного хозяйства отдела контроля качества ФУАД «Центральная Россия» Пименову С.И. за ценные советы и консультации, которые внесли значительный вклад в разработку данного исследования

REFERENCES

1. Kosenko N.V., Goryachev M.G. [Justification of the design characteristics of asphalt concrete according to GOST R 58406.2-2020 when designing road pavements]. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2022;(2): 24–27. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48959807> (accessed 27th February 2024). (In Russ.).

2. Kosenko N.V., Goryachev M.G. [System of calculation moduli of elasticity of asphalt concrete according to GOST R 58406.2-2020]. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2023;(3): 32–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49473275> (accessed 27th February 2024). (In Russ.).
3. Kadyrov G.F., Gorskiy M.Y., Zhdanov K.A., Simchuk E.N. Research of the Elastic Modulus of Stone Mastic Asphalt for Road Pavement Structures Design. *Dorogi i mosty*. 2023;(1): 273–297. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54012576> (accessed 27th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Gorskiy M.Yu., Kadyrov G.F., Strel'tsov A.V., Simchuk E.N. [Improving the methodology for calculating flexible road pavements, taking into account the application of a solution to the problem of the theory of elasticity for a multilayer half-space]. *Dorogi i mosty*. 2021;(2): 53–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47340772> (accessed 27th February 2024). (In Russ.).
5. Gorelyshev N.V. *Asfal'tobeton i drugiye bitumomineral'nyye materialy* [Asphalt concrete and other bitumen-mineral materials]. Moscow: Mozhaysk-Terra; 1995. (In Russ.).
6. Timoshenko S.P., Gud'yer Dzh. [Elasticity theory]. Moscow: Nauka; 1979. Available at: <http://volnogaz.math.msu.su/pages/books/%D0%A2%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE,%20%D0%93%D1%83%D0%B4%D1%8C%D0%B5%D1%80%20%20-%20%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F%20%D1%83%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf> (accessed 27th February 2024). (In Russ.).
7. Richard Kim Y. ed. *Modeling of Asphalt Concrete*. New York: ASCE Press; 2009. (In Eng.).
8. Kirillov A.M., Zavialov M.A. Modeling of Change in Asphalt Concrete Dynamic Modulus. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;(2) (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.54.8>.
9. Kiryukhin G.N. [Asphalt concrete for road and airfield surfaces: monograph]. 2023. Available at: https://matest.ru/uploads/literature/Asphalt_Concrete.pdf (accessed 27th February 2024). (In Russ.).
10. Kiryukhin G.N. [An effective model of the elastic modulus of asphalt concrete]. *The Herald of Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture Named After N. Isanov*. 2016;(1): 78–84. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25895658> (accessed 27th February 2024). (In Russ.).
11. Lesueur D., Blázquez M., Garcia D., Rubio A. On the impact of the filler on the complex modulus of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2017;19(5). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1288653>.
12. Liu Y., You Z., Dai Q., Mills-Beale J. Review of advances in understanding impacts of mix composition characteristics on asphalt concrete (AC) mechanics. *International Journal of Pavement Engineering*. 2011;12(4). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575142>.
13. Setiawan A., Suparma L.B., Mulyono A.T. Modelling Effect of Aggregate Gradation and Bitumen Content on Marshall Properties of Asphalt Concrete. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2017;7(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.2.2084>.
14. Lapchenko A.S. Correlation of Binders Penetration with Moduluses of Elasticity of Asphalt Concrete and Asphalt-Polymer-Concrete on Their Base. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2011;(1): 141–146. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44119097> (accessed 27th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Md Rashadul I., Mohiuddin A., Rafiqul A.T. Effect of Loading Rate on the Properties of Asphalt Concrete Using Three-Point Bending Test. *Advanced Materials Research*. 2014;1096. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1096.553>.
16. Kosenko N.V., Goryachev M.G., Lugov S.V., Mishina D.Yu. Comparison of Road Asphalt Concrete Designed According to Different State Standards to Justify Their Design Characteristics When Designing Pavements. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022;(2): 4. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49103640> (accessed 27th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Natalya V. Kosenko — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, e-mail: m.nat-93@mail.ru
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1129088

Mikhail G. Goryachev — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, e-mail: kafedra_sed@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=302221

Sergei M. Dmitriev — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, e-mail: kafedra_sed@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=868928

Sergei V. Yarkin — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, e-mail: kafedra_sed@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1053358

Submitted: 1st March 2024. Revised: 6th May 2024. Published online: 20th May 2024.

The authors would like to express their gratitude to D.V. Koshelev, chief of the Asphalt Concrete and Road Technologies Department of the Applied Research Road Laboratory of the State Enterprise «BeldorNII», and S.I. Pimenov, Leading Road Expert of the Quality Control Department of the Federal Motorway Administration Central Russia, for their valuable advice and consultations, which made a significant contribution to the development of this study