

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>
EDN: YOGPUR



УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУСТОТ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В.В. Чусов, Р.Х. Муртазин, А.С. Александров ✉

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Показано, что воздушные пустоты по своей сути являются дефектами структуры асфальтобетона. Приведены сведения о математических моделях, учитывающих влияние содержания воздушных пустот как на модуль упругости асфальтобетона, так и на срок службы дорожной одежды, выраженный в суммарном числе расчетных нагрузок, которые могут быть реализованы до разрушения дорожной одежды. Поэтому учет содержания воздушных пустот при определении модуля упругости асфальтобетона, применяемого в расчете дорожной одежды, является актуальной задачей, имеющей практическую значимость.

Методы и материалы. Выполнен анализ методов учета эффекта накопления повреждений, применяемых к расчету асфальтобетонных и других материалов по сопротивлению усталостному разрушению. На основании этого анализа сделан вывод о возможности применения к определению модуля упругости асфальтобетона теории повреждаемости. Подчеркнута аналогия между повреждаемостью Ю.Н. Работного и содержанием воздушных пустот. При этом обоснована возможность применения к расчету модуля упругости асфальтобетона принципа деформационной эквивалентности поврежденной и сплошной среды. К расчету напряжения от растяжения при изгибе применена концепция Л.М. Качанова, состоящая в увеличении величины напряжения при возрастании количества повреждений.

Результаты. Приведены результаты расчета модулей упругости асфальтобетона на битуме марок БНД при различном содержании воздушных пустот, но в пределах, допускаемых ГОСТ Р 58406.2–2020. За счет этого дополнены данные ГОСТ Р 71404–2024 о значениях модулей упругости асфальтобетонов. Целесообразность дополнения авторами данных ГОСТ Р 71404–2024 объясняется тем, что температура асфальтобетонной смеси в различных частях кузова самосвала различна, что обуславливает неодинаковые условия уплотнения смеси по ее температуре. В этом случае испытания кернов, взятых из точек отбора, расположенных друг от друга на близком расстоянии, показывают практически одинаковое содержание битума, но разное содержание воздушных пустот. Поэтому при проектировании жестких дорожных одежд нужно ориентироваться на модули упругости асфальтобетона, соответствующие максимальному допуску по содержанию воздушных пустот.

Заключение. Полученные результаты позволяют более детально производить расчет дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, содержание воздушных пустот, модуль упругости асфальтобетона

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, работа выполнена по собственной инициативе авторов.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Чусов В.В., Муртазин Р.Х., Александров А.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Чусов В.В., Муртазин Р.Х., Александров А.С. Учет влияния содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетонов для расчета дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 1000-1017. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

EDN: YOGPUR

THE CONSIDERATION OF AIR VOID CONTENT EFFECT ON ASPHALT CONCRETE ELASTIC MODULUS IN PAVEMENT DESIGN

Vasiliy V. Chusov, Rais Kh. Murtazin, Anatoliy S. Aleksandrov ✉

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. It has been demonstrated that air voids are inherently structural defects in asphalt concrete. The article presents information on mathematical models that take into account the influence of air void content on both the elastic modulus of asphalt concrete and the service life of the pavement, expressed as the cumulative number of design loads that the pavement can withstand before failure. Therefore, considering air void content when determining the elastic modulus of asphalt concrete used in pavement design is a relevant and practically significant task.

Materials and methods. The analysis of methods for accounting the damage accumulation effect applied to the fatigue destruction resistance calculation of asphalt concrete and other materials has been performed. Relying on this analysis, it was concluded that the damage theory can be used to determine the elastic modulus of asphalt concrete. The analogy between Yu. N. Rabotnov's damage parameter and air void content is emphasized. Furthermore, the possibility of applying the principle of deformational equivalence between a damaged and a homogeneous medium to the calculation of asphalt concrete elastic modulus is justified. The concept proposed by L.M. Kachanov, which involves an increase in stress magnitude with an increasing number of damages, was applied to the calculation of tensile stress in bending.

Results. The results of calculating the elastic moduli of bitumen-based asphalt concrete (grades BND) with varying air void content, but within the limits permitted by GOST R 58406.2-2020, have been presented. This let the authors to supplement the data on elastic modulus values for asphalt concretes in GOST R 71404-2024. The reason to add the data in GOST R 71404-2024 is explained by the fact that the temperature of the asphalt concrete mix in different parts of the dump truck body varies, which leads to different compaction conditions for the mix based on its temperature. In this case, tests of cores taken from sampling points located close to each other show almost identical bitumen contents, but different air void contents. Therefore, when designing flexible road surfaces, it is necessary to focus on the elastic moduli of asphalt concrete that correspond to the maximum limits for the content of air voids.

Conclusion. The obtained results allow to make more detailed pavement design calculations.

KEYWORDS: asphalt concrete, air void content, elasticity modulus of asphalt concrete

The article was submitted: September 31, 2025; approved after reviewing: December 14, 2025; accepted for publication: December 14, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Chusov V.V., Murtazin R. Kh., Aleksandrov A.S. The consideration of air void content effect on asphalt concrete elastic modulus in pavement design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 1000-1017. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

© Chusov Vasiliy V., Murtazin Rais Kh., Aleksandrov Anatoly S., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование нежестких дорожных одежд по ГОСТ Р 71404–2024¹ основано на расчете конструкции по трем основным критериям: прочности, морозоустойчивости и осушению дорожных одежд и рабочего слоя земляного полотна. В рамках расчета на прочность выполняется расчет предварительно назначенной конструкции по критерию упругого прогиба. После этого выполняются две проверки. Целью первой проверки является оценка сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна и песчаных дополнительных слоях основания. Вторая проверка предназначена для оценки сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе асфальтобетона, применяемого в нижнем слое покрытия

или в основании. Для каждого расчета необходимо назначить модули упругости материалов конструктивных слоев, в том числе асфальтобетонов. При этом учитывают зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры, типа и марки применяемого органического вяжущего и назначения конструктивного слоя (для основания или для покрытия). При расчете на действие статической нагрузки дополнительно учитывают номинальный максимальный размер заполнителя (НМР). В качестве примера приведем регламентируемые ГОСТ Р 71404–2024 значения модулей упругости асфальтобетонов на битумах марок БНД, изготовленных согласно требованиям по ГОСТ Р 58406.2–2020².

Таблица 1
Модули упругости асфальтобетона, регламентируемые ГОСТ Р 71404–2024,
при расчете на действие кратковременной нагрузки
Источник: данные заимствованы из ГОСТ Р 71404–2024, таблица Г.4.

Table 1
The elasticity moduli of asphalt concrete, regulated by GOST R 71404–2024,
when calculating the effect of a short-term load application
Source: data is taken from GOST R 71404–2024, Table G4.

Конструктивный слой	Тип асфальтобетона 0		Величина модуля упругости, МПа, при температуре (° C)					
			10	20	30	40	50	60
Покрытие	Асфальтобетоны по ГОСТ Р 58406.2 на битумах по ГОСТ 33133–2014 ³	БНД 130/200	3650	2150	1100	750	500	300
		БНД 100/130	5200	3000	1600	1000	550	350
		БНД 70/100	6400	4150	2700	1450	650	500
		БНД 50/70	7200	4800	3350	1850	900	600
Основание	Асфальтобетоны по ГОСТ Р 58406.2 на битумах по ГОСТ 33133–2014	БНД 130/200	3150	1600	800	550	350	250
		БНД 100/130	4450	2300	1250	850	450	350
		БНД 70/100	5450	3250	2100	1250	550	450
		БНД 50/70	6100	3700	2550	1550	750	520

¹ ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 141 с.

² ГОСТ Р 58406.2–2020 (взамен ПНСТ 184–2019) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Общие технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2020 г. № 192-ст – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

³ ГОСТ 33133–2014 (Введен впервые) Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования: введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2015 г. № 520-ст – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что стандарт РФ (ГОСТ Р 71404) при расчете на действие кратковременной нагрузки учитывает зависимость модуля упругости асфальтобетонов от температуры, вида органического вяжущего и его вязкости. Все остальные факторы учитываются путем подразделения асфальтобетонов по области применения – либо в покрытии, либо в основании. Принимая во внимание требования ГОСТ Р 58406.2–2020, при конструировании асфальтобетонных покрытий и оснований учитываются условия дорожного движения, что позволяет назначить асфальтобетонную смесь с соответствующим условиям эксплуатации зерновым составом. Однако, применяя данные ГОСТ Р 71404, нельзя установить влияние зернового состава и НМР на величину модуля упругости. Кроме того, в ГОСТ Р 71404 отсутствует учет влияния на модуль упругости таких факторов, как содержание органического вяжущего (СВ), содержание воздушных пустот (СВП) – незаполненные пустоты, и пустот, наполненных битумным вяжущим (ПНБ). Безусловно, это упущение стандарта. Оно объяснимо тем, что в современных условиях государственные стандарты разрабатываются малочисленными коллективами специалистов и в короткие сроки. При таком подходе человеческих и материальных ресурсов оказывается недостаточно, поэтому необходимо вносить предложения по доработке того или иного стандарта в период его действия. Авторы работы [1] справедливо полагают, что из-за разной скорости движения на городских дорогах и внегородских транспортных объектах время действия нагрузки тоже отличается. Поэтому модули упругости асфальтобетона, применяемые для расчета дорожных одежд, для таких дорог должны отличаться. В работах [2, 3] приведено обоснование расчетных модулей упругости горячих асфальтобетонов, изготовленных по ГОСТ Р 58406.2, и результаты испытания асфальтобетонных образцов из смесей А22От, А16Вт и А8Вт трехточечным изгибом. Для изготовления образцов использовался битум не только одной марки, он был взят из одной партии. Результаты испытаний показали различия в модулях упругости. Отличие модулей упругости асфальтобетонов А16Вт и А8Вт, приготовленных на битуме одной партии, подтверждает влияние зернового состава и НМР на модуль упругости асфальтобетона.

Нужно отметить, что факт влияния на величину модуля упругости зернового состава и НМР, как и других физических показателей, известен, но ресурсов для испытания всех типов асфальтобетона при вариации показателей физических свойств у лабораторий университетов и НИИ не хватает. Поэтому актуальность приобретают исследования, направленные на разработку расчетных способов определения модулей упругости при вариации показателей их физических свойств.

Влияние воздушных пустот на параметры прочности и деформативности асфальтобетонов и их срок службы, выраженный в годах или предельном числе расчетных нагрузок, анализируется в работах специалистов дорожной отрасли. В большинстве своем такие исследования посвящены изучению усталости асфальтобетона, которую необходимо учитывать при проектировании. В этом случае принимается гипотеза о начальном состоянии асфальтобетонных образцов. Согласно данной гипотезе считается, что до приложения повторных нагрузок образец имеет нулевую поврежденность. Тогда начальное содержание воздушных пустот остается не учтенным, хотя и может оговариваться в ограничениях математической модели. Это можно объяснить тем, что СВП является параметром качества асфальтобетона и имеет ограничения максимальным и минимальным значением в керне или образце, изготовленном в лаборатории. То есть математические модели описывают влияние усталости на характеристики механических свойств и эксплуатационные параметры асфальтобетонов с допустимым СВП. Также известны работы, в которых исследовано влияние превышения СВП допускаемого максимального значения на срок службы дороги.

Нужно отметить, что методика расчета нежесткой дорожной одежды, регламентированная ГОСТ Р 71404, учитывает влияние усталостных явлений. Так, при расчете по критерию упругого прогиба влияние усталостных процессов учтено при вычислении минимальной величины требуемого модуля упругости, рассчитываемой на суммарное число приложений расчетной нагрузки. В критерии сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе влияние числа приложенных нагрузок учитывается при вычислении прочности на растяжение при изгибе. Таким образом, методика расчета дорожной одежды по

ГОСТ Р 71404 требует раскрытия зависимости модуля упругости асфальтобетона, уплотненного до допускаемого СВП, которое варьируется в сравнительно небольшом диапазоне. Тем не менее, учитывая сходство воздушных пустот с повреждениями асфальтобетона, обзор работ, исследующих влияние усталостных процессов на показатели механических свойств асфальтобетона, полезен для решения задач, поставленных в данной публикации.

Среди работ, выполненных в этом направлении, следует отметить публикации, базирующиеся на принципах суммирования повреждений (линейном или нелинейном). Принцип линейного суммирования повреждений Пальмгрена⁴ – Майнера⁵ применяется в целях прогнозирования остаточного ресурса асфальтобетонного покрытия и показателя ровности IRI. Такие исследования проводятся как в нашей стране, так и за рубежом [4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12]. В самом простом случае, когда воздействие на материал оказывают одинаковые нагрузки (например, расчетная АК-11,5), принцип линейного суммирования повреждений предполагает, что поврежденность материала определяется отношением числа приложенных нагрузок к их предельной величине, которую способен выдержать материал. Тогда основной задачей становится раскрытие зависимости предельного числа нагрузок от ее параметров и параметров материалов конструкции. В этом направлении большая работа проделана

нашими зарубежными коллегами. Разработанные ими математические модели в качестве независимых переменных включают: модуль упругости асфальтобетона^{6,7} или деформацию растяжения от изгиба, которая связана с модулем упругости^{8,9,10}, параметры качества асфальтобетона: содержание битума, содержание воздушных пустот и пустот, наполненных битумным вяжущим^{11,12}.

Следует отметить, что модуль упругости поврежденной среды можно определить, применяя принципы деформационной или энергетической эквивалентности. Суть этих принципов основана на том, что модуль упругости поврежденного материала вычисляется произведением модуля упругости такого же, но сплошного материала, и параметра, называемого поврежденностью, варьирующегося от нуля до единицы. Это соответствует основам теории повреждаемости, созданным Л.М. Качановым¹³ и Ю.Н. Работновым¹⁴ и развитым в трудах Ж. Леметра¹⁵. Применение принципов эквивалентности состояний поврежденной и сплошной среды стало самостоятельным направлением в области изучения влияния усталостных процессов на параметры механических свойств асфальтобетона. В работах [13, 14, 15] получены решения о влиянии количества нагрузок на параметры теории повреждаемости (сплошность Л.М. Качанова и поврежденность Ю.Н. Работнова) и модуль упругости асфальтобетона. В работе [16] приведены экспериментальные данные, под-

⁴ Palmgren A. Die lebensdauer von kugellagern. Veifahrenstechnik. 1924; 68: 339–341.

⁵ Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics. 1945; 12: 159–164.

⁶ Fin F., et al. The uses of distress prediction subsystems for the design of pavement structures. Proc., 4th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Lexington. 1977; 3–38.

⁷ Di Benedetto H., Soltani A.A., Chaverot P. Fatigue Damage for Bituminous Mixtures: A Pertinent Approach. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. 1996; 65: 142–158.

⁸ Pell P.S. Pavement Materials. Proc., Sixth International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements. 1987; 2: 36–70.

⁹ Perret J., Ould-Henia M., Dumont A-G. High modulus pavement design using accelerated loading testing (ALT). 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna. 2004; Paper 205: Book I: 203 – 212.

¹⁰ Maupin G.W. Test for Predicting Fatigue Life of Bituminous Concrete. Transportation Research Record. 1977; 659: 32–37.

¹¹ Bonnaure F., Gravois A., Udron J. A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1980; 49: 499–529

¹² Zhou F., Fernando E., Scullion T. A review of performance models and test procedures with recommendations for use in the Texas m-e design program. Report 0-5798-1. Texas transportation institute. The Texas A&M University System College Station, Texas. 2008.

¹³ Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.

¹⁴ Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

¹⁵ Lemaitre J.A. Course on damage mechanics. 2nd edn. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, 1996. 247 p.

тверждающие возможность использования полученных решений. Однако и эти решения, и данные экспериментов получены с применением гипотезы о начальном состоянии асфальтобетона.

Вместе с тем факт влияния содержания воздушных пустот на величину модуля упругости асфальтобетона, его усталостную долговечность, износостойкость и другие показатели установлен в работах многих специалистов. Такое влияние в настоящее время сложно опровергнуть.

Например, в работе австралийских специалистов [17] изучено влияние содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетона и его эксплуатационные показатели: истираемость и проницаемость. Эксперименты выполнены для оценки влияния СВП на параметры пористых смесей, отличающихся от плотных асфальтобетонов высоким содержанием воздушных пустот. В этой работе установлено, что с увеличением СВП коэффициент проницаемости возрастает, а модуль упругости уменьшается. Причем эти зависимости практически линейны. Следовательно, зависимость модуля упругости пористого асфальтобетона от СВП [17], качественно схожа с зависимостью модуля упругости плотного асфальтобетона от поврежденности, полученной с привлечением принципа деформационной эквивалентности состояний сплошной и поврежденной среды [16].

Энвусо Игве (университет науки и технологий Риверс, Нигерия, штат Риверс) выполнил экспериментальные работы и опубликовал их результаты [18], подтверждающие зависимость динамического модуля упругости асфальтобетона от содержания воздушных пустот. Для выполнения эксперимента изготавливались две группы образцов. В образцах первой группы применен немодифицированный асфальтобетон, содержащий 3–6% битума и СВП, варьирующееся в пределах от 3,6% (при наибольшем содержании битума) до 8,3% (при наименьшем содержании битума). Вторая группа образцов изготовлена из асфальтобетона с оптимальным содержанием битума 4,5% и добавлением каучукового латекса, что позволяло получить различное

СВП (от 2,7 до 5,4%). Испытания выполнены путем приложения нагрузок с частотой 0,1; 1; 5; 10 и 25 Гц, то есть выполнены испытания на усталость асфальтобетона. Результаты этих экспериментов подтверждают зависимость динамического модуля упругости от начального содержания воздушных пустот. Причем при приложении нагрузки любой частоты зафиксировано уменьшение модуля упругости при увеличении начального СВП. Эта зависимость в полулогарифмических координатах ($\lg E$ от СВП) линейна. Логарифмическая зависимость повреждаемости, а равно и модуля упругости асфальтобетона, от числа приложенных нагрузок получена теоретически в работе [14]. При этом укажем, что в работах Э. Игве приведено начальное СВП, но данных об изменении этого параметра в условиях воздействия циклических нагрузок нет. В работе [19] Э. Игве экспериментально обосновал математическую модель, связывающую предельное число нагрузок с деформацией асфальтобетонного образца и модулем упругости. Область применения такой модели ограничена начальным СВП в асфальтобетоне.

Специалисты дорожной отрасли проводили исследования, состоящие в оценке влияния содержания воздушных пустот на срок службы покрытия дорожной одежды. В работе¹⁶ установлено, что повышение содержания воздушных пустот на 1%, по сравнению с базовым уровнем в 7%, приводит к сокращению срока службы покрытия примерно на 10%. В работе [20] получена математическая модель, предсказывающая сокращение срока службы асфальтобетонного покрытия в зависимости от содержания воздушных пустот и их максимально допустимого значения. В обширном экспериментальном исследовании¹⁷, выполненном при участии известного специалиста Карла Монисмита, сделан вывод, что в целях обеспечения усталостной долговечности асфальтобетона контроль содержания воздушных пустот важнее контроля содержания битума. В этом исследовании установлено, что содержание воздушных пустот, по сравнению с содержанием битума, в большей степени влияет на прочностные характеристики асфальтобетона в условиях приложения повторных

¹⁶ Linden R.N., Mahoney J.P., Jackson N.C. Effect of Compaction on Asphalt Concrete Performance. Transportation Research Record. 1989; 1217: 20–28.

¹⁷ Harvey J.T., Deacon J.A., Tsai B.W., Monismith C.L. Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report No. RTA-65W485-2, Institute of Transportation Studies University of California. Berkeley. 1995; 189 p.

нагрузок. Так, авторы данной работы пишут: «Если целевое содержание битума составляет 5%, а воздушных пустот – 5%, то несоблюдение целевых показателей приводит к следующему. Уменьшение количества битума на 1% приводит к сокращению срока службы на 12%. Увеличение количества воздушных пустот на 1% приводит к сокращению срока службы на 30%. Уменьшение количества битума на 1% в сочетании с увеличением количества воздушных пустот на 1% приводит к сокращению срока службы на 39%». В публикации [21] исследовано влияние содержания воздушных пустот и, соответственно, качества уплотнения асфальтобетона на его износостойкость. Таким образом, работы, преследующие цель изучения влияния усталостных процессов на показатели механических свойств асфальтобетона и его эксплуатационные параметры, а также срок службы, учитывают только начальное СВП. В процессе воздействия циклических нагрузок СВП изменяется, возрастая при образовании новых повреждений. Поэтому в усталостных моделях начальное СВП следует рассматривать как механизм ограничения области применения модели.

Авторы работ [22, 23, 24, 25, 26] определяли динамический модуль упругости асфальтобетона в зависимости от температуры образца, частоты циклической нагрузки, зернового состава, содержания воздушных пустот, содержания битума и его вязкости, в целях оценки возможности применения моделей Хирша и Витчака. Модели Хирша и Витчака рекомендуют применять для проектирования дорожных одежд, ориентируясь на вычисленный логарифм динамического модуля упругости и последующее вычисление этого параметра посредством антилогарифмирования. Многофакторное моделирование динамического модуля упругости асфальтобетона [22, 23, 24, 25, 26] базируется на большом объеме экспериментальных данных, накопленных в различных университетах, транспортных и дорожных департаментах. Наиболее современные математические модели разработаны при помощи нейронной сети, в которую загружается огромный массив данных. Отметим, что в связи с переходом на асфальтобетоны Евросоюза и США, Россия не имеет достаточного объема данных по таким асфальтобетонам. Банки данных, сформированные в СССР и РФ до 2020 г., получены на основе испытаний горячего асфальтобетона, приготавливаемого по ГОСТ 9128. Сейчас практически на всей территории страны работают с горячими сме-

сями, приготавливаемыми по ГОСТ Р 58406.2. Таким образом, дорожная отрасль РФ лишена возможности современного нейронного моделирования параметров асфальтобетона.

Отсюда и вытекают упущения ГОСТ Р 71404 по назначению модулей упругости асфальтобетонов, учитывающие лишь малую часть факторов, влияющих на величину этого параметра. Поэтому специалистам дорожной отрасли необходимо выполнить большой объем работы по учету факторов, влияющих на величину модуля упругости асфальтобетона.

Цель нашей статьи состоит в выявлении зависимости модуля упругости от начального содержания воздушных пустот для дополнения базы данных ГОСТ Р 71404.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Средство достижения поставленной цели состоит в применении теории повреждаемости Качанова – Работного – Леметра и принципа деформационной эквивалентности поврежденной и сплошной среды, используемого в этой теории. Применение данного принципа основано на том, что деформацию поврежденной среды ε_D можно определить двумя способами. Первый способ предполагает, что при простом напряженном состоянии деформация поврежденного материала может быть определена отношением напряжения σ , возникающего в таком же, но сплошном материале, к модулю упругости поврежденного материала E_D . При таком подходе для простого одноосного напряженного состояния справедлива традиционная формула

$$\varepsilon_D = \frac{\sigma}{E_D}. \quad (1)$$

Второй способ состоит в том, что деформация поврежденного материала ε_D определяется отношением напряжений σ_D , возникающих в поврежденном материале, к модулю упругости этого же, но сплошного материала. При таком подходе к расчету напряжения в поврежденной среде σ_D применяется концепция Л.М. Качанова. Гипотеза Л.М. Качанова постулирует, что любая компонента тензора напряжений поврежденного тела σ_{ijD} находится отношением аналогичной компоненты тензора напряжений в сплошном теле к сплошности (Ψ) Л.М. Качанова или к разности единицы и поврежденности (D) Ю.Н. Работного. В случае одноосного напряженного состояния напряжение и деформацию поврежденного тела вычисляют по формулам:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1-D}; \quad \varepsilon_D = \frac{\sigma}{1-D} \cdot \frac{1}{E}. \quad (2)$$

Безусловно, между формулами для вычисления деформации поврежденного материала, записанным выражением (1), и зависимостью (2), можно положить равенство. Тогда связь модулей упругости поврежденного и сплошного материала становится очевидной и выражается известной зависимостью Жана Леметра¹⁸:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1-D}; \quad \varepsilon_D = \frac{\sigma}{1-D} \cdot \frac{1}{E}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет вычислить модуль упругости материала в зависимости от поврежденности D , которая в условиях действия нагрузки возрастает. Таким образом, параметр D можно представить функцией величины напряжения и времени действия нагрузки или функцией величины напряжения и числа кратковременных нагрузок. В представлении (3) модуль упругости E характеризует деформационные свойства материала при нулевой поврежденности, то есть при $D = 0$, что описывает случай $E_D = E$. На самом деле любой материал обладает пористостью, применительно к асфальтобетонам пористость называют содержанием воздушных пустот. Следовательно, при изучении влияния усталости на величину модуля упругости необходимо ввести гипотезу о начальном состоянии. Эта гипотеза утверждает, что, несмотря на имеющиеся в асфальтобетонном образце воздушные пустоты, образец считается сплошным до момента приложения к нему нагрузки. В действительности модуль сплошной среды E , используемый в формуле (3), применительно к асфальтобетону представляет собой модуль упругости с учетом определенного, но допустимого содержания воздушных пустот $E_{свп}$. С

учетом такой трактовки зависимость (3) нужно записать в виде

$$E_D = E \cdot (1-D). \quad (4)$$

Таким образом, основной нашей задачей является раскрытие зависимости модуля упругости асфальтобетона $E_{свп}$ от содержания воздушных пустот. Для решения этой задачи возможно применение того же принципа деформационной эквивалентности.

Возможность данного подхода подтверждается тем, что воздушные пустоты по своей сути представляют собой повреждения (дефекты структуры). Причем это можно показать сопоставлением формулы, регламентируемой ГОСТ Р 58401.8–2019, для расчета СВП с зависимостями вычисления поврежденности Ю.Н. Работного через плотности поврежденной и сплошной среды. И так, согласно ГОСТ Р 58401.8–2019¹⁹, содержание воздушных пустот, измеряемое в %, определяют расчетным способом, а вычисление этого параметра выполняют по формуле

$$P_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \cdot 100, \quad (5)$$

где P_a – содержание воздушных пустот, %; G_{mb} и G_{mm} – соответственно объемная и максимальная плотности асфальтобетона, определяемые по ГОСТ Р 58401.10–2019²⁰ и ГОСТ Р 58401.16–2019²¹, г/см³.

Отметим, что меры теории повреждаемости (сплошность Л.М. Качанова и повреждаемость Ю.Н. Работного) измеряют в долях от единицы, допуская их вариацию от нуля до единицы. Поэтому для демонстрации аналогии СВП поврежденности Ю.Н. Работного в зависимости (5) сделаем простое преобразование, не меняющее физической сути. Пусть

¹⁸ Lemaitre J., Dufailly J. Damage measurements. *Engineetieg Fracture Mechanics*. 1987; 516(28): 643–661. doi. org/10.1016/0013-7944(87)90059-2.

¹⁹ ГОСТ Р 58401.8–2019 (взамен ПНСТ 108–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения содержания воздушных пустот: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2019 г. № 270-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 3 с.

²⁰ ГОСТ Р 58401.10–2019 (взамен ПНСТ 106–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 июня 2019 г. № 285-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

²¹ ГОСТ Р 58401.16–2019 (взамен ПНСТ 92–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения максимальной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2019 г. № 273-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.

P_a измеряется в процентах, а применяемое нами обозначение СВП есть мера P_a в долях от единицы. Тогда получим

$$\text{СВП} = \frac{P_a}{100} = 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}. \quad (6)$$

Наиболее простой гипотезой при определении поврежденности материала является допущение о том, что в процессе накопления дефектов в структуре материала масса поврежденного образца должна сохраняться, тогда как объем поврежденного тела должен возрастать по мере увеличения пористости. Тогда поврежденность может быть определена разностью единицы и отношения плотностей поврежденной (ρ_D) и сплошной (ρ) среды. Такая зависимость является наиболее распространенной и самой простой из всех представлений поврежденности через плотности поврежденной и сплошной среды. Но на практике при наличии повреждений сферической формы, увеличение объема, вызванное повреждениями, связано с увеличением площади поверхности этих повреждений. В общем случае для трехмерного объекта объем пропорционален линейному размеру в кубе (L^3), а площадь поверхности – линейному размеру в квадрате (L^2). Следовательно, площадь поверхности пропорциональна объему в степени $2/3$ ($V^{2/3}$).

Для расчета поврежденности через плотности сплошной и поврежденного тела применяют формулы:

$$D = 1 - \frac{\rho_D}{\rho}; \quad D = 1 - \left(\frac{\rho_D}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (7)$$

$$D = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

Первая из этих формул тождественна зависимости (6). Тогда модуль упругости с учетом определенного, но допустимого содержания воздушных пустот $E_{\text{СВП}}$ найдем по формуле

$$E_{\text{СВП}} = E_{\text{max}} \cdot (1 - \text{СВП}), \quad (8)$$

где E_{max} – модуль упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона, под которым понимается материал без воздушных пустот.

Обсуждая модуль упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона E_{max} , отметим, что с позиций обеспечения работоспособности асфальтобетонного слоя определенное и допускаемое ГОСТ Р 58406.2 СВП является необходимым условием. При устройстве асфальтобетонного слоя нельзя допустить как недостаточное уплотнение смеси, так и ее переуплотнение.

На практике такой асфальтобетон забракууют, потому что уплотнять смесь до содержания воздушных пустот меньше нижнего допускаемого предела нельзя. Это связано с тем, что асфальтобетонное покрытие воспринимает воздействие погодных-климатических факторов и транспортной нагрузки. При изменении температуры изменяется и объем асфальтобетона, что может привести к «выпотеванию» битумного вяжущего. Этот же дефект переуплотненного асфальтобетона может появиться при воздействии транспортной нагрузки [27]. Кроме того, переуплотнение асфальтобетона приводит к повышению напряжения на контакте зерен заполнителя, что может привести к их дроблению и истиранию. В этом случае изменится зерновой состав, поэтому под термином «эталонный абсолютно плотный асфальтобетон» нами понимается абстрактный материал с нулевым содержанием воздушных пустот. Ввод этого параметра обусловлен тем, что он необходим для дальнейшего расчета. Его можно определить экспериментально, но только по результатам испытаний асфальтобетонных образцов со строго определенным содержанием СВП, соответствующим допускам, оговоренным в ГОСТ Р 58406.2. Это объясняется тем, что уплотнить асфальтобетонный образец до нулевого содержания воздушных пустот достаточно сложно, нужно создать большое давление, но не приводящее к разрушению зерен щебня. Поэтому гораздо целесообразнее изготовить образцы по ГОСТ Р 58401.11–2019²² и отобрать из них нужное количество с одним и тем же СВП, например $P_a = 2,5\%$ (СВП = 0,025). Отобранные образцы нужно подвергнуть испытанию и определить модули упругости. После статистической

²² ГОСТ Р 58401.11–2019 (взамен ПНСТ 135–2016) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной прочности при многократном изгибе: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 июня 2019 г. № 286-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

обработки результатов получим модуль $E_{\text{СВП}}$, величина которого соответствует содержанию воздушных пустот (в нашем примере СВП = 0,025). Модуль упругости эталонного асфальтобетона E_{max} выражается из зависимости (8), после чего вычисляется по формуле

$$E_{\text{max}} = \frac{E_{\text{СВП}}}{1 - \text{СВП}}. \quad (9)$$

Здесь нами описано стандартное экспериментальное решение, но есть нюанс, состоящий в том, что показатели свойств компонентов асфальтобетонной смеси отличаются, хотя и не выходят за рамки допускаемых значений. В этом случае на результаты даже безупречно проведенных испытаний повлияет не только параметр СВП, но и вариация параметров качества компонентов асфальтобетонной смеси. Исключение такого влияния требует большого количества испытаний и, как следствие, удорожание эксперимента. Поэтому величину модуля упругости эталонного асфальтобетона лучше определить расчетом с использованием значений модулей упругости $E_{\text{ГОСТ}}$, рекомендуемых в ГОСТ Р 71404, содержании воздушных пустот СВП_{ГОСТ}, при котором эти значения определены. При такой постановке задачи расчетная формула примет вид:

$$E_{\text{max}} = \frac{E_{\text{ГОСТ}}}{1 - \text{СВП}_{\text{ГОСТ}}}. \quad (10)$$

Для применения формулы (10) необходимо определить параметр СВП_{ГОСТ}. При этом будем полагать, что эти модули упругости определены при СВП, соответствующем их среднему допускаемому значению 4,5% в кернах покрытия и 5,5% – основания. Избегая десятых и обеспечивая запас по прочности для последующих расчетов, примем СВП_{ГОСТ} = 4% для асфальтобетонов покрытий и СВП_{ГОСТ} = 5% – оснований.

Таким образом, в данном подразделе нашей публикации разработана методика вычисления модуля упругости асфальтобетона с учетом содержащихся в его структуре воз-

душных пустот. Методика базируется на общепризнанной теории повреждаемости Качанова – Работного, а также принципах эквивалентности физического и механического состояния, представленных в работах Ж. Леметра. На первом шаге вычислений производит расчет модуля упругости эталонного асфальтобетона, под которым понимается абстрактный материал с нулевым содержанием воздушных пустот. В расчете по формуле (10) используют значения модулей упругости, регламентируемые ГОСТ Р 71404, и содержание воздушных пустот практически, равное их среднему допустимому значению. На втором шаге по формуле (8) определяют искомый модуль, учитывающий фактическое содержание воздушных пустот. Здесь хотим еще раз обратить внимание специалистов, что модуль упругости E_{max} представляет собой абстрактную величину. Ввод этого параметра был необходим для донесения логики нашего расчета. Сделав такие пояснения, можно произвести подстановку формулы (10) в основную зависимость (8). В результате получим

$$E_{\text{СВП}} = \frac{E_{\text{ГОСТ}}}{1 - \text{СВП}_{\text{ГОСТ}}} \cdot (1 - \text{СВП}). \quad (11)$$

Рассматривая формулу (11), можно констатировать, что из нее абстрактное понятие модуля упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона исключено. Тем самым мы демонстрируем абстрактность величины E_{max} и показываем, что ввод этой величины и соответствующего ей понятия не должен вызывать нареканий. Во всем остальном предлагаемый нами расчет полностью вписан в концепцию повреждаемости материалов Качанова – Работнова – Леметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оговорив все условия расчета модулей упругости эталонного асфальтобетона, их можно вычислить по формуле (10). Результаты расчета модулей упругости эталонного асфальтобетона на битуме марок БНД приведены в таблице 2.

Таблица 2

Кратковременные модули упругости эталонного асфальтобетона

Источник: табличные данные получены авторами в результате расчета по формуле (10).

Table 2

Short-term elasticity moduli of ideal standard asphalt concrete

Source: compiled by the author as a result of calculation with the use of formula 10.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °C					
		0	10	20	30	40	50
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 130/200	3802	2240	1146	781	521	313
	БНД 100/130	5417	3125	1667	1042	573	365
	БНД 70/100	6667	4323	2813	1510	677	521
	БНД 50/70	7500	5000	3490	1927	938	625
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства основания	БНД 130/200	3316	1684	842	579	368	263
	БНД 100/130	4684	2421	1316	895	474	368
	БНД 70/100	5737	3421	2211	1316	579	474
	БНД 50/70	6421	3895	2684	1632	789	547

Таблица 3

Рекомендуемые значения модулей упругости асфальтобетонов для расчета на кратковременную нагрузку

Источник: табличные данные получены авторами в результате расчета по формуле (8).

Table 3

Recommended values of the elastic moduli of asphalt concrete for calculation the effect of a short-term load application

Source: compiled by the author as a result of calculation with the use of formula 8.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	СВП, % (д.е.)	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °C					
			0	10	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 130/200	0 (0)	3802	2240	1146	781	521	313
		2 (0.02)	3726	2195	1123	765	511	307
		3 (0.03)	3688	2173	1112	758	505	304
		4 (0.04)	3650	2150	1100	750	500	300
		5 (0.05)	3612	2128	1089	742	495	297
		6 (0.06)	3574	2106	1077	734	490	294
		7 (0.07)	3536	2083	1066	726	485	291
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства покрытия	БНД 100/130	0 (0)	5417	3125	1667	1042	573	365
		2 (0.02)	5309	3063	1634	1021	562	358
		3 (0.03)	5254	3031	1617	1011	556	354
		4 (0.04)	5200	3000	1600	1000	550	350
		5 (0.05)	5146	2969	1584	990	544	347
		6 (0.06)	5092	2938	1567	979	539	343
		7 (0.07)	5038	2906	1550	969	533	339
	БНД 70/100	0 (0)	6667	4323	2813	1510	677	521
		2 (0.02)	6534	4237	2757	1480	663	511
		3 (0.03)	6467	4193	2729	1465	657	505
		4 (0.04)	6400	4150	2700	1450	650	500
		5 (0.05)	6334	4107	2672	1435	643	495
		6 (0.06)	6267	4064	2644	1419	636	490
		7 (0.07)	6200	4020	2616	1404	630	485
	БНД 50/70	0 (0)	7500	5000	3490	1927	938	625
		2 (0.02)	7350	4900	3420	1888	919	613
		3 (0.03)	7275	4850	3385	1869	910	606
		4 (0.04)	7200	4800	3350	1850	900	600
		5 (0.05)	7125	4750	3316	1831	891	594
		6 (0.06)	7050	4700	3281	1811	882	588
		7 (0.07)	6975	4650	3246	1792	872	581

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	СВП, % (д.е.)	Модуль упругости асфальтобетона, МПа, при температуре, °С					
			0	10	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для устройства основания	БНД 130/200	0 (0)	3316	1684	842	579	368	263
		3 (0,03)	3217	1633	817	562	357	255
		4 (0,04)	3183	1617	808	556	353	252
		5 (0,05)	3150	1600	800	550	350	250
		6 (0,06)	3117	1583	791	544	346	247
		7 (0,07)	3084	1566	783	538	342	245
		8 (0,08)	3051	1549	775	533	339	242
		0 (0)	4684	2421	1316	895	474	368
	БНД 100/130	3 (0,03)	4543	2348	1277	868	460	357
		4 (0,04)	4497	2324	1263	859	455	353
		5 (0,05)	4450	2300	1250	850	450	350
		6 (0,06)	4403	2276	1237	841	446	346
		7 (0,07)	4356	2252	1224	832	441	342
		8 (0,08)	4309	2227	1211	823	436	339
		0 (0)	5737	3421	2211	1316	579	474
		3 (0,03)	5565	3318	2145	1277	562	460
	БНД 70/100	4 (0,04)	5508	3284	2123	1263	556	455
		5 (0,05)	5450	3250	2100	1250	550	450
		6 (0,06)	5393	3216	2078	1237	544	446
		7 (0,07)	5335	3182	2056	1224	538	441
		8 (0,08)	5278	3147	2034	1211	533	436
		0 (0)	6421	3895	2684	1632	789	547
		3 (0,03)	6228	3778	2603	1583	765	531
		4 (0,04)	6164	3739	2577	1567	757	525
	БНД 50/70	5 (0,05)	6100	3700	2550	1550	750	520
		6 (0,06)	6036	3661	2523	1534	742	514
		7 (0,07)	5972	3622	2496	1518	734	509
		8 (0,08)	5907	3583	2469	1501	726	503
		0 (0)	5617	3389	2373	1404	629	436

Примечание: красным шрифтом указаны значения модуля упругости $E_{мах}$ для эталонного абсолютно плотного асфальтобетона, а синим шрифтом – значения, совпадающие с модулями упругости $E_{ГОСТ}$ регламентированными ГОСТ 71404–2024.

При известных значениях модулей упругости эталонного асфальтобетона по формуле (7) можно рассчитать величину модуля упругости при любом СВП, соответствующем допускаемым по ГОСТ Р 58406.2 значениям. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Анализируя данные таблицы 3, отметим, что превышение величины модуля упругости асфальтобетона, вычисленной при наименьшем допустимом содержании воздушных пустот, над значением этого параметра, рассчитанным при наибольшем СВП, составляет чуть более 5%. Казалось бы, разница невелика и фактором влияния СВП на величину модуля упругости в инженерных расчетах можно было

бы пренебречь. Однако, принимая во внимание требования к надежности проектирования дорожных одежд, необходимо отметить, что для капитальных дорожных одежд для дорог I и II категории уровень надежности составляет 0,98 и 0,95 соответственно. Это значит, что уровни значимости или вероятности ошибки составляют всего 2 и 5%. Поэтому учет влияния содержания воздушных пустот на величину модуля упругости является обязательным при проектировании капитальных одежд для дорог I и II категории и желательным для проектирования таких конструкций для дорог III и IV категорий, а также проектирования облегченных дорожных одежд.

Внедрение результатов нашей работы в практику расчета нежесткой дорожной одежды потребует индивидуального подхода к модификации каждого из трех критериев прочности. Такая необходимость продиктована тем, что изменение модуля упругости материала верхнего слоя двухслойной системы неодинаково влияет на изменение рассчитываемых параметров напряженно-деформированного состояния. В связи с этим дадим пояснения об особенностях модификации критериев расчета.

Рассматривая критерий упругого прогиба, отметим, что уменьшение модуля упругости асфальтобетона ($E_{свп}$) с увеличением содержания воздушных пустот (СВП) приведет к уменьшению модуля упругости материала верхнего слоя (E_v) в двухслойной расчетной модели. Тогда отношение модуля упругости нижнего слоя (E_n) к модулю упругости верхнего слоя (E_v), наоборот, увеличится. Увеличение отношения (E_n/E_v) приводит к увеличению рассчитываемого отношения ($E_{общ}/E_v$). Однако в этом отношении $E_v = E_{свп}$. Отсюда следует, что увеличении отношения $E_{общ}/E_v$ компенсируется уменьшением величины E_v , которая равна $E_{свп}$. В этом случае сохраняется следствие традиционного расчета, согласно которому чем меньше модуль E_v , тем меньше общий модуль упругости на поверхности двухслойной модели. Тогда модификация критерия по упругому прогибу выполняется простой заменой модулей упругости, регламентируемых ГОСТ Р 71404–2024, на их аналогии, рекомендуемые нами в таблице 3.

Аналогичная замена модулей упругости, регламентированных ГОСТ Р 71404–2024, на рекомендуемые нами значения, возможна в расчете по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды из малосвязных материалов. В этом случае чем больше содержание воздушных пустот, тем меньше модули упругости асфальтобетона $E_{свп}$. Это приводит к уменьшению модуля упругости верхнего слоя двухслойной модели E_v , величина которого рассчитывается как усредненное значение модулей упругости конструктивных слоев по толщине конструкции, лежащей выше рассчитываемого слоя. В данном случае уменьшение величины E_v приводит к уменьшению отношения E_v/E_n . Тогда для одних и тех же значений отношения h/D и угла внутреннего трения ϕ_N при расчете по номограммам ГОСТ Р 71404–2024, величина

напряжения сдвига от временной нагрузки будет тем больше, чем меньше значение отношения E_v/E_n . Следовательно, чем больше содержание воздушных пустот в верхних слоях дорожной одежды из асфальтобетона, тем больше повреждена дорожная одежда и выше напряжение сдвига в рассчитываемом элементе конструкции. Это соответствует концепции Л.М. Качанова.

Особое место в предлагаемой нами модификации занимает расчет по критерию сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе монолитных слоев. В этом расчете модуль упругости верхнего слоя E_v двухслойной системы рассчитывается как усредненное значение $E_{ср}$ модулей упругости асфальтобетонных слоев E_i по их суммарной толщине. В данном случае чем больше СВП, тем меньше модуль упругости асфальтобетона E_i в каждом слое, а значит, меньше величина усредненного модуля упругости $E_{ср}$ и модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы E_v . Тогда при уменьшении модуля упругости E_v величина отношения E_v/E_n тоже уменьшится. Уменьшение отношения E_v/E_n приведет к снижению величины рассчитываемого растягивающего напряжения σ . Это соответствует представлениям механики сплошной среды, но противоречит концепции Л.М. Качанова, согласно которой чем больше поврежден материал и меньше его сплошность, тем больше эффективное напряжение в нем. Отсюда вытекает необходимость изменения критерия, регламентируемого ГОСТ Р 71404–2024, для расчета асфальтобетонных слоев по сопротивлению усталостному разрушению от растяжения при изгибе. Для этого можно использовать концепцию Л.М. Качанова. Тогда критерий прочности примет вид:

$$\frac{\sigma_r}{(1 - \text{СВП}) \cdot k_1} < \frac{R_0 \cdot k_2 \cdot (1 - V_R \cdot t)}{K_{пр}}, \quad (12)$$

где σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в слое асфальтобетона, устанавливаемое расчетом для эталонного условно неповрежденного асфальтобетона (то есть при нулевом содержании воздушных пустот), характеризующегося модулем упругости $E_{тах}$ (см. в таблицах 2 и 3 при нулевой температуре), Па; R_0 – нормативное значение предельного сопротивления растяжению при изгибе; k_1 – коэффициент, учитывающий снижение

прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки; k_2 – коэффициент, учитывающий снижение прочности во времени от воздействия природно-климатических факторов; V_R – коэффициент вариации, равный 0,1; t – коэффициент нормированного отклонения.

В левой части критерия (12) напряжение в сплошном асфальтобетоне σ_r делится на произведение двух параметров. Первый параметр представляет собой разность единицы и СВП, он аналогичен сплошности Л.М. Качанова и учитывает увеличение эффективного напряжения в результате повреждения структуры материала воздушными пустотами. Вторым множителем k_1 – это функция усталости, определяемая так же, как в ГОСТ Р 71404–2024. Этот параметр тоже подобен сплошности Л.М. Качанова, но учитывает эксплуатационную поврежденность материала в результате накопления повреждений в процессе приложения повторных нагрузок.

Специфику расчета по предлагаемым нами модификациям целесообразно показать в отдельной статье, приведя сопоставительные расчеты по ГОСТ Р 71404–2024 и предлагаемой модификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе выполнен анализ решений по учету влияния усталостных процессов на модуль упругости асфальтобетона и срок службы конструктивных слоев дорожной одежды из этого материала. Такие решения устанавливают функциональные зависимости, описывающие уменьшение модуля упругости и сокращение срока службы из-за накопления в асфальтобетоне повреждений. Показано, что специалисты, разработавшие математические модели, сталкивались с необходимостью принятия введения гипотезы о начальном состоянии асфальтобетонного образца. В этом случае образец считается сплошным, а наличие в нем необходимого содержания воздушных пустот во внимание не принимается. Этот недостаток содержит ГОСТ Р 71404–2024, в котором значения модулей упругости асфальтобетона не зависят от содержания воздушных пустот. Найденное авторами этой работы решение базируется на теории повреждаемости Качанова – Работнова – Леметра, которая является общепризнанной мировым сообществом специалистов в области прочности материалов.

Основываясь на принципе деформационной эквивалентности, получена формула для расчета модуля упругости асфальтобетона, учитывающая начальное содержание воздушных пустот. Согласно результатам расчета, модуль упругости уменьшается при повышении содержания воздушных пустот.

Рекомендуемые значения модулей упругости можно применить при расчете нежесткой дорожной одежды. Специфика их применения показана на примере сравнения результатов расчета по критериям упругого прогиба и сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе. При этом установлено, что разница в модулях упругости асфальтобетона при наибольшем и наименьшем допуске содержания воздушных пустот составляет чуть более 5%. При этом отличие общих модулей упругости на поверхности нижнего и верхнего слоев покрытия не превышает 3%. Казалось бы, что различие совсем незначительное, но надежность проектирования дорожных одежд с усовершенствованным покрытием достаточно высокая. Так, капитальные нежесткие дорожные одежды для дорог I, II, III и IV категорий проектируют с надежностью 0,98, 0,95, 0,92 и 0,90 соответственно. Отсюда следует, что учет содержания воздушных пустот в асфальтобетоне при назначении его модуля упругости для расчета по критерию упругого прогиба для дорог I и II категорий обязателен, для дорог III и IV категорий – учет этого фактора можно характеризовать как желательный.

Задачей дальнейшего решения является: разработка предложений по применению вычисленных значений модуля упругости асфальтобетона в расчете нежесткой дорожной одежды. В частности, представляется интересным модификация расчета по критерию упругого прогиба, в которой модуль упругости слоев дорожной одежды из асфальтобетона может быть определен с учетом технологической и эксплуатационной поврежденности. Под технологической поврежденностью понимается необходимое содержание воздушных пустот. Под эксплуатационной поврежденностью понимается увеличение количества повреждений, обусловленное воздействием транспортной нагрузки и климатических факторов. В этом случае модуль упругости асфальтобетона определится по формуле

$$E_D = E_{\max} \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)$$

Приоритетной задачей дальнейших исследований является определение функции накопления повреждений D , которая должна учитывать количество расчетных нагрузок, их величину, температуру материала в конструктивном слое, а также состав асфальтобетона. Таким образом, нами намечено движение к созданию модели, не уступающей моделям Хирша и Витчака, а также их современным модификациям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенко Н.В., Горячев М.Г. Обоснование кратковременных расчетных модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд улично-дорожной сети // Наука и техника в дорожной отрасли. 2025. № 2. С. 20–22.
2. Косенко Н.В., Горячев М.Г. Обоснование расчетных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2–2020 при проектировании дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2022. № 2. С. 24–27.
3. Экспериментальные исследования модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд / Н.В. Косенко, М.Г. Горячев, С.М. Дмитриев, С.В. Яркин // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 1. URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS124.pdf>. (дата обращения: 29.10.2025). <https://doi.org/10.15862/04SATS124>
4. Углова Е.В. Прогнозирование остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий с учетом реальных условий эксплуатации // Вестник ВолгГАСУ. Серия Строительство и архитектура. 2010. № 17(36). С. 43–47.
5. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 698. Article No 077010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010>
6. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шило О.А. Прогнозирование накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях жестких дорожных одежд // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 52–61. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006>
7. Пегин П.А., Капский Д.В., Буртыль Ю.В. Разработка методики оценки продольной ровности при изменении прочности дорожных конструкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 37–47. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47>
8. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности жестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 570–583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>
9. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings // In book: Transport Infrastructure and Systems. 2017. С. 3–8. <https://doi.org/10.1201/9781315281896-1>
10. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. // Applied Sciences. 2019. Т. 1. Article No 229. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5>
11. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. // Pollack Periodica. 2022. Т. 17. № (3). С. 59–64. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00588>
12. Olexa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials. // Pollack Periodica. 2016; Т. 11. №3. С. 131–140. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12>
13. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria Of Strength And Plasticity Of Asphalt Concrete With The Account Of Effect Of Accumulation Of The Damage While Influence Of Re-Load. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 463. 2. С. 022021.
14. Chusov V.V., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Accounting Of Damage Of Asphalt Concrete In The Criteria For Calculating The Pavement. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1079. № 5. С. 052016.
15. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Применение принципа эквивалентности энергетической эквивалентности сплошных и поврежденных тел к расчету асфальтобетонных покрытий по критериям прочности и пластичности // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 3 (711). С. 79–88.
16. Экспериментальное исследование накопления повреждений в асфальтобетонных покрытиях / Александрова Н.П., Александров А.С., Семенова Т.В., Чусов В.В. // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 4. С. 114–127.
17. Hassan N.A. et al. Effects of air voids content on the performance of porous asphalt mixtures. // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Т. 20. № 11. С. 11884–11887.
18. Igwe E.A. Effects of Air Voids Variation on Stiffness Property of HMA Concrete Modified with Rubber Latex. // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2015. Т. 3. № 9. С. 86–93.
19. Igwe E.A., Ottos C.G. Investigating the Effect of Air Voids Content in Fatigue Life of Hot Mix Asphalt Mixtures: Case Study of Rubberized Asphalt Con-

crete. // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2016. T. 3. № 5. С. 56–64.

20. Salini R., Lenngren C., High air-void volume implications for asphalt concrete service-life and price penalty. // The Civil Engineering Journal. 2022. T. 1, article No 5. С. 1–8.

21. Baimukhametov G., Gayfutdinov R., Khafizov E. Calculation of the influence of various compaction on the wear resistance of asphalt concrete using material loss calculation approach. // Magazine of Civil Engineering. 2024. T. 17. № 1. Article no. 12505. <https://doi.org/10.34910/MCE.125.5>

22. Ekwulo E.O., Eme D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement // The International Journal Of Engineering And Science. 2013. T. 2. № 8. С. 62–77.

23. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis. // International Journal of Pavement Engineering. 2023. T. 24. № 1. Article No 2268808. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808>

24. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. // International Journal of Pavement Engineering. 2023. T. 24. No 2. Article № 2270569, <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569>

25. Belhaj M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt. // Infrastructures. 2025. №. 10. Article № 269. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>

26. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling. // Civil Engineering Journal. 2025. T. 11(7): 2765–2781. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08>

27. Симчук Е.Н., Жданов К.А., Дедковский И.А. Совершенствование подходов и методов оценки физических и эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона в России // Дороги и мосты. 2021. Вып. 45. № 1. С. 181–221.

REFERENCES

1. Kosenko N.V., Goryachev M.G. Justification of the loading duration of the street and road network pavements. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2025; 2: 20–22. (In Russ.)

2. Kosenko N.V., Goryachev M.G. Justification of Design Parameters of Asphalt Concrete According to GOST R 58406.22020 for Pavement Design. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2022; 2: 24–27. (In Russ.)

3. Kosenko N.V., Goryachev M.G., Dmitriev S.M., Yarkin S.V. Investigational studies of asphalt

concrete elastic moduli for pavement design. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2024; 11(1). Available at: <https://t-s.today/PDF/04SATS124.pdf> (in Russ.). <https://doi.org/10.15862/04SATS124>. (In Russ.)

4. Uglova E.V. Forecasting of the residual resource asphalt concrete coverings with the account real working conditions. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering. Series Construction and Architecture*. 2017; 36(17): 43–47 (in Russ.)

5. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698: Article No 077010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010>

6. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shilo O.A. Prediction of Failure Fatigue Accumulation in Asphalt Concrete Layers of Flexible Pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019; 55(3): 52–61. (In Russ.) Doi 10.25987/VSTU.2019.55.3.006

7. Pegin P.A., Kapski D.V., Burtul Yu.V. Development of Assessment Methodology for Pavement Longitudinal Evenness When Road Construction Durability Changes. *Bulletin of scientific research results*. 2022; 4: 37–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47>

8. Burtul Y. V., Kapski D. V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

9. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B. Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings. *In book: Transport Infrastructure and Systems*. 2017; 3-8. <https://doi.org/10.1201/9781315281896-1>

10. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. *Applied Sciences*. 2019; 1: Article No 229. doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5

11. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. *Pollack Periodica*. 2022; 17(3): 59–64. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00588>

12. Oleksa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials. *Pollack Periodica*. 2016; T. 11. №3. С. 131–140. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12>

13. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria Of Strength And Plasticity Of Asphalt Concrete With The Account Of Effect Of Accumulation Of

The Damage While Influence Of Re-Load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; Article No. 022021.

14. Chusov V.V., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Accounting Of Damage Of Asphalt Concrete In The Criteria For Calculating The Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079: 5: Article No. 052016.

15. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Application of the principle of energy equivalence of continuous and damaged bodies to calculation of asphalt concrete coatings by strength and plasticity criteria. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018; 711(3): 79–88.

16. Aleksandrova N.P., et al. Experimental investigation of damage accumulation in asphalt-concrete coatings. *News of higher educational institutions. Construction*. 2019; 724(4): 114–127.

17. Hassan N.A. et al. Effects of air voids content on the performance of porous asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 20(11): 11884–11887.

18. Igwe E.A. Effects of Air Voids Variation on Stiffness Property of HMA Concrete Modified with Rubber Latex. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2015; 9(3): 86–93.

19. Igwe E.A., Ottos C.G. Investigating the Effect of Air Voids Content in Fatigue Life of Hot Mix Asphalt Mixtures: Case Study of Rubberized Asphalt Concrete. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2016; 3(5): 56–64.

20. Salini R., Lenngren C., High air-void volume implications for asphalt concrete service-life and price penalty. *The Civil Engineering Journal*. 2022; 1: article No 5: 1–8.

21. Baimukhametov G., Gayfutdinov R., Khafizov E. Calculation of the influence of various compaction on the wear resistance of asphalt concrete using material loss calculation approach. *Magazine of Civil Engineering*. 2024; 17(1): Article no. 12505. <https://doi.org/10.34910/MCE.125.5>

22. Ekwulo, E.O., Eme, D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement. *The International Journal Of Engineering And Science*. 2013; 2(8): 62–77.

23. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(1): Article No 2268808. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808>

24. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(2): Article No 2270569. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569>

25. Belhaj M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures

with Reclaimed Asphalt. *Infrastructures*. 2025; 10: Article No 269. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>

26. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(7): 2765–2781. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08>

27. Simchuk E. N., Zhdanov K. A., Dedkovsky I. A. Improving approaches and methods for assessing physical and operational properties of road asphalt concrete in Russia. *Roads and Bridges*. 2021; 45(1): 181–221.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Чусов В.В. Сформулировал основную идею работы, установил аналогию между содержанием воздушных пустот в асфальтобетоне и поврежденностью Ю.Н. Работнова, обосновал применимость принципа деформационной эквивалентности к расчету модуля упругости асфальтобетона.

Муртазин Р.Х. Выполнил расчеты величины модуля упругости асфальтобетона в зависимости от содержания воздушных пустот, составил таблицы, дополняющие данные ГОСТ Р 71404–2024.

Александров А.С. Анализ состояния вопроса, написание текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Chusov V.V. Main idea formulation, establishment of the analogy between the void content in asphalt concrete and the damage mechanics described by Yu. N. Rabotnov, justification of the applicability of the principle of deformational equivalence to the calculation of the asphalt concrete elastic modulus.

Murtazin R. Kh. Calculations of the asphalt concrete elastic modulus of asphalt concrete depending on the content of air voids, and compiling tables supplementing the data from GOST R 71404-2024.

Aleksandrov A. S. Literature review, writing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чусов Василий Владимирович – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), соискатель ученой степени канд. техн. наук (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>,

SPIN-код: 2212-2543,

Author ID: 865632,

e-mail: chysow@gmail.com

Муртазин Раис Харисович – магистрант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), работает над

магистерской диссертацией (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-код: 7573-4997,

Author ID (РИНЦ): 639655,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chusov Vasilii V. – Lecturer, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI), pursuing a de-

gree of Candidate of Technical Sciences. (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

Murtazin Rais Kh. – Master's student, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI), currently working on his Master's thesis. (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

Aleksandrov Anatoliy S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Road Construction and Operation Department, The Siberian State Automobile and Road University (SibADI). (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (RINC): 639655,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru