

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>

УДК 625.851

Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности

Науч. сотруд. А. А. Афанасенко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Аспект, затронутый в рамках данной научной статьи, имеет важное значение в области дорожного строительства, нацеленной не только на достижение высокой прочности и устойчивости асфальтобетона, но и на обеспечение оптимальных характеристик его структуры. Основные принципы оптимизации зернового состава базируются на параметрах размеров и формы частиц каменного заполнителя, входящего в состав асфальтобетонных смесей. Глубокий анализ зернового состава способствует достижению оптимального баланса между крупными и мелкими фракциями, что, в свою очередь, обеспечивает устойчивость и долговечность асфальтобетонного покрытия. Максимальная плотность асфальтобетонной смеси играет ключевую роль, влияя на ее физико-механические свойства и способность противостоять агрессивному воздействию окружающей среды и транспортным нагрузкам. Кроме того, плотность смеси существенно влияет на ее стойкость к статическим и динамическим нагрузкам и деформациям, что важно для обеспечения безопасности дорожного движения. Статья представляет собой аналитический обзор основных принципов и методологии определения зернового состава мелкозернистых асфальтобетонных смесей с крупностью зерен до 10 мм с целью достижения их максимальной плотности. Рассмотрены отечественные и зарубежные методики оптимизации параметров проектирования смесей. На основании учета идеальных математических кривых зернового состава установлена основная закономерность для мелкозернистого асфальтобетона, которая имеет схожие параметры с математической кривой Фуллера. Понимание и практическое применение принципов построения зернового состава асфальтобетонных смесей максимальной плотности не только повышает качество дорожного строительства, но и способствует более эффективному использованию ресурсов, обеспечивая устойчивость и долговечность дорожного покрытия. Это приводит к снижению затрат на обслуживание и ремонт дорог, что является важным аспектом в контексте экономической эффективности инфраструктурных проектов. Таким образом, улучшение методов исследования и контроля зернового состава асфальтобетона имеет важное значение для устойчивого развития дорожного строительства.

Ключевые слова: асфальтобетон, зерновой состав асфальтобетонной смеси, плотные смеси, кривая гранулометрического состава, коэффициент сбега, диаметр зерен, кривая Фуллера, экспериментальный метод подбора, остаточная пористость, Supergrape

Для цитирования: Афанасенко, А. А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности / А. А. Афанасенко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>

Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density

A. A. Afanasenka¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aspect raised in this scientific paper is of great importance in the field of road construction, aimed not only at achieving high strength and stability of asphalt concrete, but also at ensuring optimal characteristics of its structure.

Адрес для переписки

Афанасенко Алексей Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 338-78-40
CNIIDSGM@bntu.by

Address for correspondence

Afanasenka Aliaksei A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 338-78-40
CNIIDSGM@bntu.by

The main principles for the optimization of the grain composition are based on the parameters of the size and shape of the stone aggregate particles included in the composition of asphalt concrete mixtures. An in-depth analysis of the grain composition helps to achieve an optimal balance between coarse and fine fractions, which in turn ensures the stability and durability of the asphalt concrete pavement. The maximum density of an asphalt concrete mixture plays a key role, influencing its physical and mechanical properties and ability to withstand aggressive environmental influences and traffic loads. In addition, the density of the mixture significantly affects its resistance to static and dynamic loads and deformations, which is important for ensuring road safety. The paper provides an analytical review of the basic principles and methodology for determining the grain composition of fine-grained asphaltic concrete mixtures with grain sizes up to 10 mm in order to achieve their maximum density. Both domestic and foreign methods for optimizing mixture design parameters are considered. Based on the consideration of ideal mathematical curves the grain composition, the main regularity for fine-grained asphalt concrete has been established, which has similar parameters to the mathematical Fourier curve. Understanding and practical application of the principles of constructing the grain composition of asphalt concrete mixtures of maximum density not only improves the quality of road construction, but also contributes to a more efficient use of resources, ensuring the stability and durability of the pavement. This leads to a reduction in road maintenance and repair costs, which is an important aspect in the context of the economic efficiency of infrastructure projects. Thus, improving the methods for investigating and controlling the grain composition of asphalt concrete is important for the sustainable development of road construction.

Keywords: asphalt concrete, grain composition of asphalt concrete mixture, dense mixtures, grain size distribution curve, runaway coefficient, grain diameter, Fuller curve, experimental selection method, residual porosity, Superpave

For citation: Afanaska A. A. (2024) Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density. *Science and Technique*. 23 (3), 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241> (in Russian)

Введение

Асфальтобетон представляет собой высокотехнологичный строительный материал, который является одним из наиболее распространенных и широко используемых в устройстве покрытия дорог и улиц населенных пунктов. Этот материал обладает уникальными свойствами, делающими его предпочтительным выбором для создания прочных, долговечных и высококачественных дорожных одежд. Важным аспектом его популярности является не только его прочность, но и возможность адаптации к различным климатическим условиям и транспортным нагрузкам как главного и неотъемлемого компонента дорожного строительства.

В современных подходах к созданию качественных дорожных покрытий подбор состава асфальтобетонных смесей является основополагающей частью процесса производства долговечной и устойчивой дорожной инфраструктуры. Этот процесс приобретает особую актуальность в условиях исключительных требований к высоким стандартам качества. Существует обширный спектр специально разработанных методов и методик для подбора составов асфальтобетонных смесей. Каждый из этих подходов адаптирован к конкретным условиям, включая погодные-климатические факторы и транспортные особенности, что делает их более эффективными в определенных контекстах использования.

Специалисты в области дорожного строительства активно исследуют и разрабатывают все более адаптивные методы подбора составов

асфальтобетонных смесей с целью повышения производительности. От химического анализа компонентов до оптимизации фракционного состава эти подходы направлены на обеспечение оптимальных свойств асфальтобетона для различных условий эксплуатации. Особое внимание уделяется методам, основанным на принципах простоты и понятности. Такие методы приобретают особую значимость в контексте их использования на производственных площадках, где требуются оперативность и эффективность в процессе производства асфальтобетонных смесей и максимальная скорость при корректировке состава.

Подбор состава плотных смесей

Подбор состава асфальтобетона — это комплексный инженерный процесс, направленный на определение наилучшего соотношения и качества основных компонентов асфальтобетонной смеси, таких как битум, минеральный порошок, песок, щебень и/или гравий. Исключительная важность подбора состава обусловлена не только требованиями к прочности и долговечности асфальтобетона, но и его адаптацией к конкретным условиям эксплуатации, что обеспечивает оптимальное функционирование его на разных типах дорог и в разнообразных климатических условиях.

Проектирование состава асфальтобетонных смесей в странах постсоветского пространства, не исключая и Республику Беларусь [1], осуществляется по методике, основанной на под-

боре кривой гранулометрического состава, входящей в предельные кривые плотных смесей. Основной принцип этого метода, разработанного в СоюзДорНИИ [2], заключается в учете зависимости прочности и других свойств асфальтобетона от плотности минеральной смеси при оптимальном количестве битума. Оптимальное количество битума обычно определяется на основе результатов экспериментов, учитывающих наивысшую прочность образцов и другие показатели их качества, соответствующие требованиям стандарта.

Основные принципы метода опираются на теоретические и экспериментальные исследования профессора В. В. Охотина [3] и профессора Н. Н. Иванова [4]. Считается, что составы с достаточной плотностью включают в себя минеральные смеси, где диаметр частиц (d) уменьшается в два раза, а масса соответствующих фракций уменьшается в пределах 0,65–0,9 раза. Величина, определяющая, во сколько раз количество последующей фракции меньше количества предыдущей, называется коэффициентом сбега (k).

Таким образом, отношение диаметров частиц (d) можно представить в следующем виде:

$$d_2 = \frac{d_1}{2}; d_3 = \frac{d_1}{2^2}; \dots; d_n = \frac{d_1}{2^{n-1}}, \quad (1)$$

где d_1 – размер наибольшего отверстия сита, мм; d_n – то же наименьшего отверстия сита, мм; d_2, d_3, \dots – то же промежуточных отверстий сит, мм.

Отношение по массе последующих фракций к предыдущей (коэффициент сбега k) можно определить по следующей зависимости:

$$k = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \dots = \frac{x_n}{x_{n-1}}, \quad (2)$$

где x_1 – содержание наибольшей фракции зерен в смеси, %; x_n – то же наименьшей фракции зерен в смеси, %; x_2, x_3, \dots – то же промежуточных фракции зерен в смеси, %.

Исследования Н. Н. Иванова [4, 5] показали, что максимальная плотность асфальтобетонной смеси достигается при коэффициенте сбега от 0,80 до 0,81, однако, учитывая трудности, связанные с точным подбором такого состава, предлагалось расширить диапазон значений коэффициента сбега от 0,65 до 0,90. Этот диапазон обеспечил баланс между желаемой высо-

кой плотностью смеси и реальными проблемными моментами, с которыми можно столкнуться при подборе состава. Принятый коэффициент сбега в указанном интервале предоставил инженерам и специалистам оптимальные возможности для адаптации состава асфальтобетона к конкретным условиям производства и требованиям, предъявляемым к дорожному асфальтобетонному покрытию.

Расчетные количества каждой фракции отображаются на графике, где по оси ординат указывают полный проход через сито в процентах, а по оси абсцисс – логарифмы размеров зерен или отверстий сит. На рис. 1 представлен пример кривых гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона при различных коэффициентах сбега.

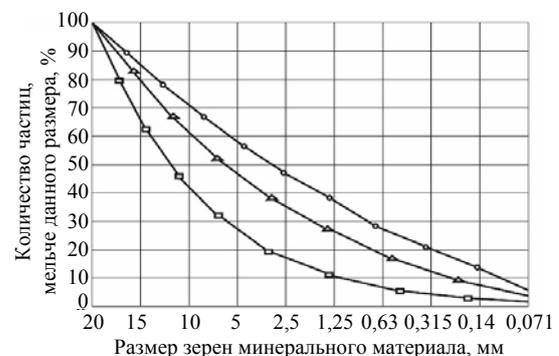


Рис. 1. Гранулометрический состав минеральной части асфальтобетонных смесей с различными коэффициентами сбега

Fig. 1. Granulometric composition of mineral fraction of asphaltic concrete mixes with different flow coefficients

Кривые с коэффициентом сбега менее 0,7 соответствуют смесям с низким содержанием минерального порошка или без него, в то время как кривые с коэффициентом сбега более 0,9 отражают смеси с высоким содержанием минерального порошка. Выбор коэффициента сбега зависит от предпочтительного соотношения минерального порошка и щебня в смеси, а также от требуемой плотности минеральной части смеси, стремясь получить реальную кривую смеси, которая находится между предельными кривыми плотных смесей.

Исходя из теоретических данных определения оптимальной кривой плотных смесей, с учетом зависимостей (1) и (2) построим аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси с максимальным размером зерен 10 мм (рис. 2).

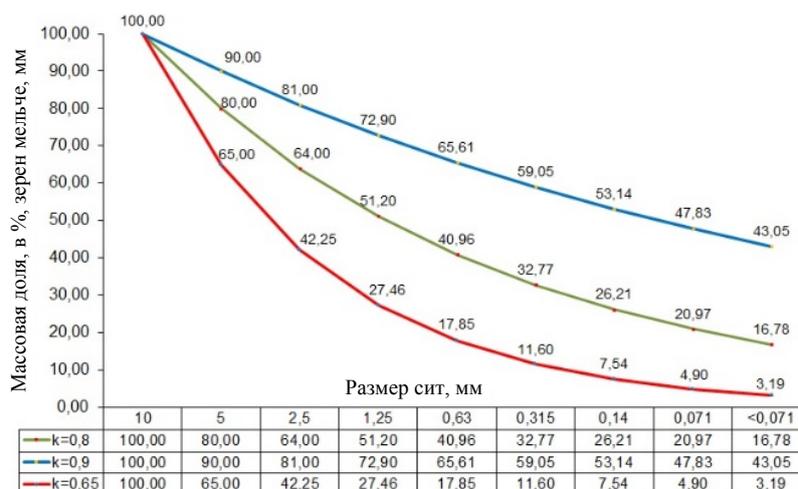


Рис. 2. Аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси с различными значениями коэффициента сбега

Fig. 2. Analytical curves of grain composition of fine-grained asphalt concrete mixtures with different values of flow coefficient

Таким образом, любая мелкозернистая асфальтобетонная смесь с размером зерен не крупнее 10 мм, соответствующая действующим стандартам, должна входить в построенные граничные аналитические кривые, а с целью обеспечения максимальной плотности и, как следствие, необходимости минимального количества вяжущего стремится приблизиться к построенной аналитической кривой с коэффициентом сбега 0,8.

Оптимизация состава по критерию плотности

До недавнего времени оптимизацию состава смесей для создания верхних слоев дорожных покрытий ассоциировали с увеличением плотности асфальтобетона. В результате этого в области дорожного строительства можно выделить три метода, используемых при оптимизации плотности и формировании зерновых составов минимальной пустотности, исходя из зернового состава крупного заполнителя [6]:

- экспериментальный (немецкий) метод подбора плотных смесей, заключающийся в постепенном заполнении одного материала другим;
- метод кривых, основанный на подборе зернового состава, приближающегося к заранее определенным математически «идеальным» кривым плотных смесей;
- американский метод стандартных смесей, основанный на апробированных составах смесей из конкретных материалов.

Сущность экспериментального метода подбора плотных смесей заключается в постепенном заполнении пор одного материала с более крупными зернами другим более мелким минеральным материалом. Практически подбор смеси осуществляется в следующем порядке. К 100 весовым частям первого материала добавляют последовательно 10, 20, 30 и т. д. весовых частей второго, определяя после их перемешивания и уплотнения среднюю плотность и выбирая смесь с минимальным количеством пустот в уплотненном состоянии. Если необходимо составить смесь из трех компонентов, то к плотной смеси из двух материалов добавляют постепенно увеличивающимися порциями третий материал и также выбирают наиболее плотную смесь.

Принцип последовательного заполнения пустот применен в методике проектирования оптимальных составов дорожных асфальтобетонов, в которых используются щебень, гравий и песок с любой гранулометрией [7]. По данным авторов статьи, на основе дедуктивного анализа испытаний агрегатных смесей с различным содержанием компонентов различной крупности установлена сложная математическая зависимость для определения «пустоты в минеральном агрегате» (Void in Mineral Aggregate, VMA). Он отражает объем пор (пустот) в минеральном заполнителе и определяет долю пространства, которое может быть заполнено вяжущим. VMA, наряду с содержанием

воздуха, является важным показателем в критериях проектирования смесей различных типов асфальтобетона. Авторы статьи постарались учесть все факторы, влияющие на создание плотной асфальтобетонной смеси с учетом остаточной пористости и количества вовлеченного воздуха, здесь также вводятся дополнительные коэффициенты, учитывающие размер и форму минеральных частиц и их поверхностную пористость. Лабораторные испытания контрольных смесей показали хорошую сходимость с результатами теоретических расчетов.

Второй метод оптимизации подбора зернового состава асфальтобетона основывается на подборе плотных минеральных смесей, зерновой состав которых приближается к идеальным кривым Фуллера, Графа, Германа, Болоея, Тэлбот–Ричарда, Китт–Пеффа и других авторов [8]. Эти кривые в большинстве случаев представляются степенными зависимостями требуемого содержания зерен в смеси от их крупности. Например, кривая гранулометрического состава плотной смеси, по Фуллеру, задается следующим уравнением:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где P – процент агрегата, проходящего через сито, %; d – диаметр отверстий сита, мм; D – максимальный диаметр частиц в агрегате, мм.

Это уравнение используется для определения оптимального гранулометрического состава асфальтобетонной смеси, чтобы обеспечить наиболее плотную упаковку частиц минерального заполнителя. Графическое изображение кривой Фуллера для случая проектирования мелкозернистой асфальтобетонной смеси с максимальным размером зерен 10 мм представлено на рис. 3.

В практике проектирования асфальтобетонных смесей в рамках метода Supergrave [9, 10], внимание акцентируется на регулировании зернового состава с целью оптимизации плотности. В данном контексте, также принято использование гранулометрических кривых плотных смесей Фуллера, которые соответствуют степенной зависимости с показателем степени 0,45 и представляют собой инструмент для определения максимальной плотности асфальтобетона. Так, кривая гранулометрического состава в данном случае задается следующим уравнением:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,45}. \quad (4)$$

Этот подход позволяет настраивать структуру смеси с учетом особенностей размеров и распределения минеральных фракций, что, в свою очередь, способствует достижению оптимальных плотностей асфальтобетона.

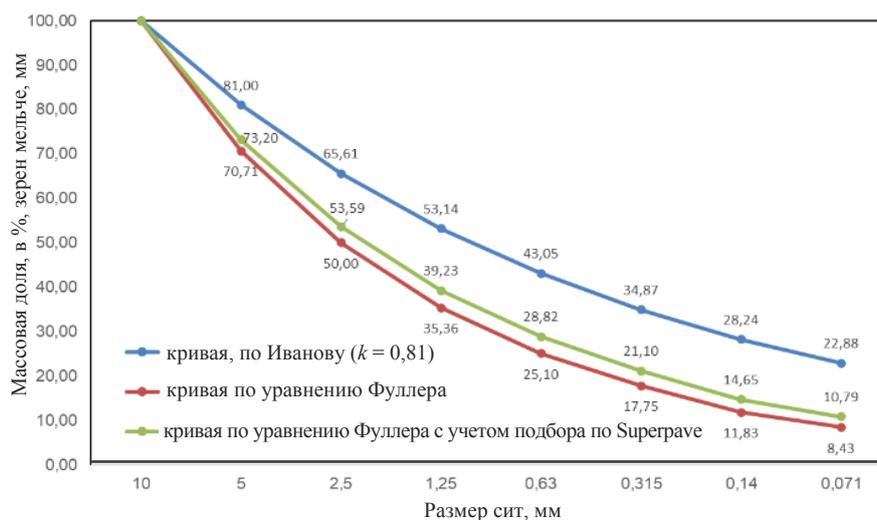


Рис. 3. Аналитические кривые зернового состава мелкозернистой асфальтобетонной смеси оптимальной плотности

Fig. 3. Analytical grading curves of fine-grained asphalt concrete mixture with optimum density

Построим аналитические кривые зернового состава плотных смесей по зависимостям (3) и (4) для случая мелкозернистого асфальтобетона с максимальным размером зерен 10 мм (рис. 3). Таким образом математические кривые плотных смесей, построенные по уравнению Фуллера (3), и кривая с учетом корректировки в методике проектирования состава асфальтобетона по методу Supergrape (4), а также кривая зернового состава по критерию плотности Н. Н. Иванова, определенная по формулам (1), (2), визуально имеют одинаковый характер наклона, что позволяет делать выводы об их взаимосвязи.

Проведя несложные расчеты методами математической статистики, осуществим анализ зависимости между кривыми с целью выявления и количественного описания связи между переменными. В качестве метода для оценки была выбрана линейная регрессия, которая позволяет оценить линейную зависимость между двумя переменными, далее проверим нашу гипотезу.

В линейной регрессии предполагается, что зависимость между переменными может быть описана линейной функцией

$$y = mx + b, \quad (5)$$

где y – зависимая переменная; x – независимая переменная; m – коэффициент наклона; b – свободный член.

Для нахождения коэффициентов m и b , которые наилучшим образом соответствуют данным, воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК). Этот метод минимизирует сумму квадратов разностей между значениями зависимых и независимых переменных. Это делается с целью найти наилучшую линейную аппроксимацию данных. Формулу для вычисления коэффициента наклона m можно описать по зависимости (6), а коэффициент b можно определить по выражению:

$$m = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}, \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum y - m(\sum x)}{n}, \quad (7)$$

где n – количество наблюдений.

Таким образом, зависимость между данными, полученными по формуле Фуллера (3), и данными, полученными по формулам (1), (2) (представлены на рис. 4), может быть описана следующим выражением:

$$y = 0,8374x + 20,1877, \quad (8)$$

где y – данные, полученные по формулам (1), (2), учитывающие критерий плотности для мелкозернистой асфальтобетонной смеси, по Н. Н. Иванову, с коэффициентом сбега $k = 0,81$; x – то же, полученные по формулам (3) для мелкозернистой асфальтобетонной смеси по критерию идеальной математической кривой плотной смеси Фуллера.

Коэффициент корреляции рассчитывался с использованием критерия наименьших квадратов. Формула для коэффициента корреляции (r) в случае линейной регрессии с использованием метода наименьших квадратов выглядит следующим образом:

$$r = \frac{(\sum x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции в нашем случае $r = 0,9933$, что свидетельствует о сильной положительной линейной зависимости между переменными. Значение r , близкое к 1, указывает на то, что изменения в переменной x сильно связаны с изменениями в переменной y . Таким образом, наше предположение о линейной зависимости между данными с высокой долей вероятности является правильным.

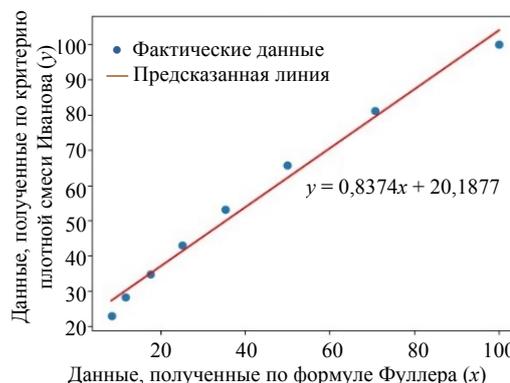


Рис. 4. Зависимость между данными для определения максимальной плотности мелкозернистой смеси по разным методикам

Fig. 4. Dependency between data for determining maximum density of fine-grained mixture using different methods

С помощью сравнительных расчетов было определено, что кривая Фуллера, наиболее близкая к кривой плотной смеси с коэффициентом сбега, равным 0,73, а оптимальная кривая плотной асфальтобетонной смеси по критерию профессора Н. Н. Иванова для случая мелкозернистого асфальтобетона с максимальным размером зерен 10 мм может быть описана идеальной кривой Фуллера со степенью 0,3 и определена по зависимости

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,3} . \quad (10)$$

ВЫВОДЫ

1. В ходе анализа различных методик подбора зернового состава для мелкозернистых асфальтобетонных смесей с максимальным размером зерен 10 мм установлена математическая зависимость, позволяющая произвести его оптимизацию по критерию максимальной плотности.

2. Крупность и геометрические параметры минерального наполнителя представляют собой важные переменные в управлении структурой асфальтобетона и могут оказать значительное влияние на его физические и механические свойства. Учет их в исследованиях обеспечит более глубокое понимание взаимосвязи между гранулометрическим составом и характеристиками асфальтобетонных смесей, что, в свою очередь, будет содействовать разработке эффективных методов оптимизации такого важного для дорожной отрасли строительного материала, как асфальтобетон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, И. И. Испытание дорожно-строительных материалов: учеб. пособие для вузов / И. И. Леонович, В. А. Стрижевский, К. Ф. Шумчик. Минск: Вышэйш. шк., 1991. 224 с.
2. Пособие по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов (к СНиП 3.06.03–85 и СНиП 3.06.06–88). М.: Союздорнии, 1991. 176 с.
3. Охотин, В. В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей пористости / В. В. Охотин. М.: Транспечать, 1929. 32 с.
4. Иванов, Н. Н. Строительство автомобильных дорог. Ч. 2: Постройка дорожных одежд: учеб. пособие / Н. Н. Иванов. М.: Автотрансиздат, 1957. 304 с.
5. Иванов, Н. Н. Подбор наиболее плотной смеси каменных агрегатов или грунтов для дорожных одежд /

- Н. Н. Иванов // Дорога и автомобиль, 1930. № 4–5. С. 23–28.
6. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний: обзорная информация / Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационный центр по автомобильным дорогам». М.: Информавтодор, 2005. Вып. 6: Автомобильные дороги и мосты. 48 с.
7. Inoue, T. Rational Design Method of hot Mix Asphalt Based on Calculated VMA / T. Inoue, Y. Gunji, H. Akagi // Eurasphalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2004. P. 1956–1966.
8. Горельшев, Н. В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы: учеб. пособие / Н. В. Горельшев. М.: Можайск-Терра, 1995. 175 с.
9. Superpave Mix Design. Superpave Series No 2 (SP-02) / Asphalt Institute. Lexington, KY, 2001. 117 p.
10. The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, 2012. 172 p.

Поступила 20.02.2024

Подписана в печать 23.04.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Leonovich I. I., Strizhevsky V. A., Shumchik K. F. (1991) *Testing of Road Building Materials*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 224 (in Russian).
2. *Manual for the Construction of Asphalt Concrete Pavements and Foundations of Highways and Airfields (to SNiP 3.06.03–85 and SNiP 3.06.06–88)*. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1991. 176 (in Russian).
3. Okhotin V. V. (1929) *Laboratory Experiments on the Preparation of Road Soil Mixtures Based on the Principle of Least Porosity*. Moscow, Transpechat Publ. 32 (in Russian).
4. Ivanov N. N. (1957) *Construction of Highways. Part 2: Construction of Road Pavements*. Moscow, Avtotransizdat Publ. 304 (in Russian).
5. Ivanov N. N. (1930) Selection of the Most Dense Mixture of Stone Aggregates or Soils for Road Pavements. *Doroga i Avtomobil* [Road and Car], (4–5), 23–28 (in Russian).
6. Federal State Unitary Enterprise “Information Center on Highways” (2005) *Design of Asphalt Concrete Composition and Testing Methods. Is. 6: Highways and Bridges*. Moscow, Informavtodor Publ. 48 (in Russian).
7. Inoue T., Gunji Y., Akagi H. (2004) Rational Design Method of hot Mix Asphalt Based on Calculated VMA. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Vienna, 1956–1966.
8. Gorelyshev N. V. (1995) *Asphalt Concrete and Other Bitumen-Mineral Materials*. Moscow, Mozhaysk-Terra Publ. 175 (in Russian).
9. Asphalt Institute (2001) *Superpave Mix Design. Superpave Series No 2 (SP-02)*. Lexington, KY. 117.
10. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2012) *The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program*. Washington. 172.

Received: 20.02.2024

Accepted: 23.04.2024

Published online: 31.05.2024