

Научная статья
УДК 621.793.74:62-408.64
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-38-43

Расчет рационального гранулометрического состава композиций для газотермического нанесения порошковых покрытий

Михаил Евгеньевич Соловьев¹, д.ф.-м.н.,

Сергей Львович Балдаев², к.т.н.,

Лев Христофорович Балдаев³, д.т.н.

Виктория Игоревна Мищенко⁴, зам. ген. директора по качеству

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия
^{2,3,4}ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

¹me_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

²s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

³l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

⁴v.mishchenko@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8494-0707>

Аннотация. Рассмотрена проблема выбора оптимального гранулометрического состава композиции для газотермического нанесения порошковых покрытий. Предложена методика выбора рационального гранулометрического состава композиции при заданных объемных долях компонентов.

Ключевые слова: дисперсная система, фракционный состав, кривая распределения, порошковое покрытие, газотермическое напыление

Для цитирования: Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Расчет рационального гранулометрического состава композиций для газотермического нанесения порошковых покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 38-43. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-38-43.

Original article

Site composition calculation for gas-thermal powder coating

Mikhail E. Soloviev¹, D. Phys. Math.,

Sergey L. Baldaev², Can.Sc.Tech.,

Lev Kh. Baldaev³, Dr.Sc.Tech.,

Victoria I. Mishchenko⁴

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

^{2,3,4}Technological Systems of Protective Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka, Russia

¹me_s@mail.ru, ²s.baldaev@tspc.ru, ³l.baldaev@tspc.ru, ⁴v.mishchenko@tspc.ru

Abstract. The problem of choosing the optimal site composition formulation for gas-thermal powder coatings is viewed. A method for choosing a rational site composition formulation with given components parts by volume is proposed.

Keywords: disperse system, grain particle size, cumulative distribution curve, powder coating, gas thermal spraying

For citation: Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh., Mishchenko V.I. Site composition calculation for gas-thermal powder coating. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 38-43. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-38-43.

Введение

Газотермическое нанесение порошковых покрытий обеспечивает создание на поверхности деталей слоев материала с ценным комплексом свойств: повышенной износостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью и другими специальными свойствами [1 – 3]. Нанесение на поверхность изделия дисперсного материала осуществляется высокотемпературным газовым потоком, создаваемым при помощи газофакельной или плазменной свечи. При этом частицы, спекаясь на поверхности основы, образуют покрытие, обладающее требуемыми свойствами.

Физико-химические основы данной технологии достаточно сложны [4, 5], при этом немаловажную роль играет фракционный состав дисперсного материала. Хотя при формировании покрытия происходит сплавление отдельных частиц, тем не менее при малой плотности их упаковки покрытие может содержать поры, что отрицательно отражается на его прочностных свойствах.

Задача определения фракционного состава дисперсной системы, при котором достигается максимальная плотность упаковки составляющих ее частиц, встречается во многих областях техники, в том числе при подборе фракционного состава наполнителей для бетона и асфальто-бетонных композиций [6 – 9].

Теоретически проблема плотной упаковки сферических частиц начала изучаться достаточно давно. В качестве примеров плотной упаковки монодисперсных сферических частиц можно привести кубическую и гексагональную упаковку. Плотность кубической упаковки составляет $\pi/6$ или 52,36 %. Гексагональная упаковка является наиболее плотной. Ее плотность составляет $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ или 74,05 %. Для получения более плотной структуры необходимо использовать би- или полидисперсные (присутствуют частицы двух и более размеров) смеси, т.к. пустоты, образующиеся при любом типе упаковки, заполняются частицами меньших размеров, уменьшая суммарную пустотность и увеличивая плотность упаковки. В этой связи разными авторами были предложены различные варианты функций распределения частиц по размерам, которые теоретически должны обеспечить максимально возможную их плотную упаковку [10 – 14]. Поскольку получение заданного распределения по размерам частиц практически достигается путем смешения отдельных фракций, полученных при ситовом рассеивании поли-

дисперсной смеси, такие теоретические распределения получили название оптимальных гранулометрических кривых или оптимальных кривых просеивания.

В отличие от технологии получения строительных и асфальто-бетонных смесей, в которых гранулометрическим составом композиции можно варьировать достаточно свободно, в случае порошковых композиций для газотермического нанесения покрытий такая возможность обычно отсутствует, поскольку смесь представляет собой ограниченный набор порошков, объемная доля которых задана исходя из требований к физическим свойствам покрытия. В этой связи возникают задачи либо выбора рационального гранулометрического состава композиций с заданным объемным соотношением компонентов, либо выбора объемного соотношения небольшого числа компонентов с заданным гранулометрическим составом.

Целью настоящей работы явилось сравнение различных оптимальных гранулометрических кривых и создание методики решения выше обозначенных задач по подбору рационального гранулометрического состава порошкообразной композиции для газотермического нанесения покрытия.

Результаты и обсуждение

Сравнение оптимальных гранулометрических кривых. Из числа оптимальных кривых просеивания наиболее известным является уравнение, или интегральная функция распределения, предложенная Фуллером и Томпсоном в 1907 г. [15], имеющая вид:

$$A_i = (d_i/d_{max})^n, \quad (1)$$

где A_i – проход частиц через условное сито размером d_i в относительных единицах; d_{max} – наибольший размер зерна в смеси, (или апертура верхнего сита); n – коэффициент распределения, равный по Фуллеру 0,5.

Швейцарской федеральной лабораторией по испытанию материалов разработана кривая гранулометрического состава плотных смесей с уравнением:

$$A_i = 0,5(d_i/d_{max} + \sqrt{(d_i/d_{max})}). \quad (2)$$

Заметим, что зависимость (2) может быть аппроксимирована уравнением (1) подбором показателя n . В качестве примера на рис. 1 показаны оптимальные гранулометрические кривые распределений: по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; по уравнению (2) и по уравнению (1) с оптимизированным значением показателя $n = 0,71$.

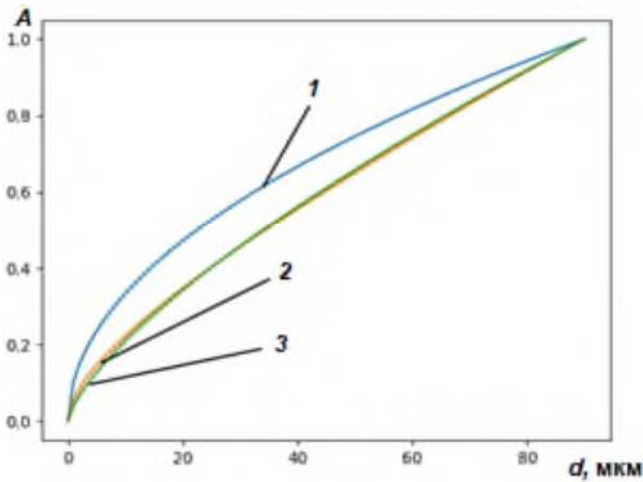


Рис. 1. Оптимальные гранулометрические кривые распределения:
 1 – по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; 2 – по уравнению (2); 3 – по уравнению (1) с показателем $n = 0,71$

Как видно, кривая 3 с достаточной для практики точностью аппроксимирует кривую 2.

Предложены также и другие аналитические выражения для оптимальных гранулометрических кривых. Все они дают похожий вид кривых и, таким образом, могут быть аппроксимированы зависимостью, предложенной Фуллером, путем подбора соответствующего значения показателя n .

Распределение Фуллера существенно отличается от таких распространенных распределений, как равномерное и нормальное распределения. Для иллюстрации на рис. 2 приведено сравнение кривой распределения Фуллера с кривыми равномерного и нормального распределений.

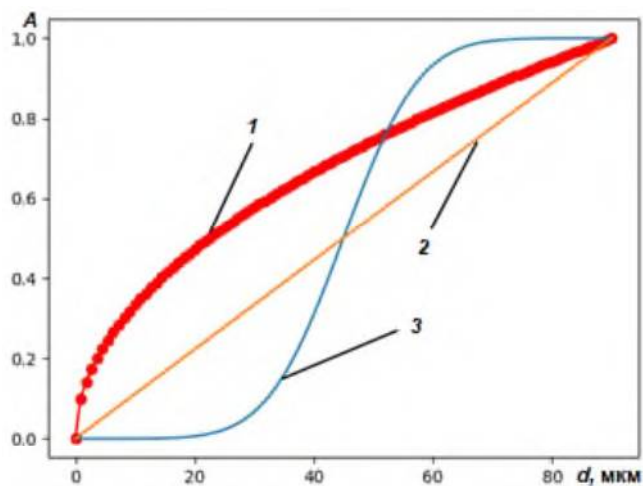


Рис. 2. Гранулометрические кривые распределений:
 1 – по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; 2 – равномерное распределение в интервале $[0, d_{max}]$; 3 – нормальное распределение с параметрами: среднее значение – $d_{max}/2$, стандартное отклонение – $d_{max}/9$

Можно отметить, что для кривой просеивания Фуллера по сравнению с нормальным распределением характерно повышенное объемное содержание мелких фракций и отсутствие точек перегиба на кривой. Это является важной особенностью всех оптимальных кривых просеивания.

При теоретических исследованиях обычно рассматривают оптимальную кривую просеивания для систем со сферической формой частиц и не учитывают возможных отклонений от этой формы для реальных систем. Учет данного фактора может быть выполнен с помощью коэффициента формы частиц, который определяется как отношение площади поверхности эквивалентной сферы S_{sph} к площади поверхности частицы S_{part} равного объема:

$$K_{sf} = S_{sph}/S_{part}. \quad (3)$$

Поскольку сфера имеет минимальную площадь поверхности для тела заданного объема, то для реальных частиц фактор формы K_{sf} всегда меньше единицы и по данным многих исследователей может изменяться в пределах $0,85 \dots 0,95$. Для учета фактора формы уравнение Фуллера (1) может быть модифицировано в форму:

$$A_i = 1 - K_{sf} + K_{sf}(d_i/d_{max})^n. \quad (4)$$

На рис. 3 показано, как изменяется оптимальная гранулометрическая кривая по уравнению (4) при значении фактора формы равном $0,85$.

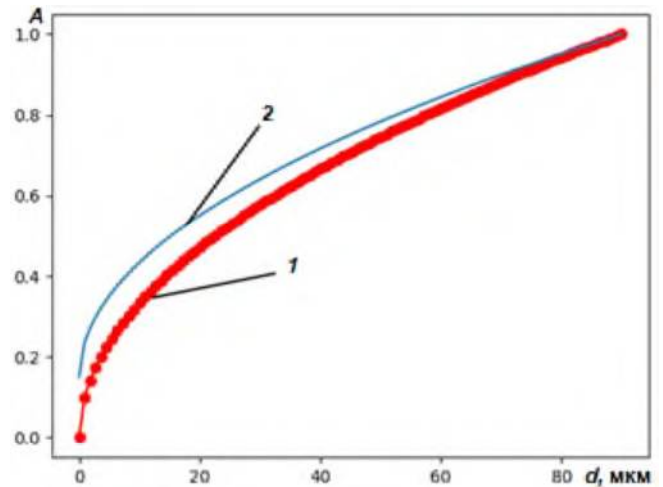


Рис. 3. Оптимальные гранулометрические кривые распределения:
 1 – по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; 2 – по уравнению (4) при значении фактора формы равном $0,85$

Видно, что с увеличением развитости поверхности частиц оптимальная кривая просеивания будет смещаться вверх по сравнению с теоретической, особенно в области частиц малых размеров.

Подбор фракционного состава композиции, близкого к оптимальному. На практике для композиционного материала, состоящего из набора порошков с разным дисперсным составом, возникает задача подобрать его таким

образом, чтобы плотность упаковки частиц была наибольшей из возможных. При этом возникает два варианта задач подбора параметров для ограниченного набора фракций порошка:

1) при заданных размерах фракций компонентов подобрать соотношение их объемов так, чтобы функция распределения была наиболее близкой к теоретической;

2) при заданном объемном соотношении компонентов подобрать соотношение размеров их фракций.

При решении данных задач распределение размеров частиц в узкой фракции можно принять равномерным. Тогда опытная кривая распределения будет представлять собой набор отрезков прямых.

Степень близости опытной функции распределения к теоретической можно, например, оценивать по величине коэффициента детерминированности:

$$R^2 = 1 - \sum_i \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (5)$$

где y_i – значения функции оптимизируемого распределения \hat{y}_i – значения функции теоретического распределения; \bar{y}_i – среднее значение функции теоретического распределения.

Близость значения R^2 к единице будет свидетельствовать о близости теоретического и исследуемого распределений.

Если объемные доли компонентов не заданы, то для их расчета можно использовать формулу теоретического распределения, например, (1). Весь имеющийся диапазон размеров частиц $[0, d_{max}]$ с помощью набора сит рассеивается на фракции $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$, $i = 1 \dots N$. При этом $d_{max}^0 = 0$, $d_{max}^N = d_{max}$. Расчет объемов фракций производится на основании формулы теоретического распределения с использованием в ней d_{max}^i в качестве параметра. Если функцию теоретического распределения обозначить как $A(n, d_i, d_{max}^i)$, то объемные доли каждой фракции могут быть рассчитаны по формуле:

$$\phi^i - \phi^{i-1} = A(n, d_{max}^i, d_{max}^i) - A(n, d_{max}^{i-1}, d_{max}^i), \quad (6)$$

при этом $\phi^0 = 0$, $\phi^N = 1$.

Формула для расчета функции опытного распределения в интервале размеров частиц $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$ будет иметь вид:

$$y_i = \sum_{j=0}^{i-1} \phi^j + \phi^i (d_i - d_{max}^{i-1}) / (d_{max}^i - d_{max}^{i-1}). \quad (7)$$

Варьируя наборы диапазонов размеров частиц, что достигается путем наборов соответствующих сит, с использованием формул (6), (7) можно получать композиции с фракционным составом частиц, близким к функции

теоретического распределения, а следовательно, имеющими более высокую плотность упаковки. В качестве примера на рис. 5 приведена теоретическая кривая распределения (1) с показателем $n = 0,5$ и две опытные функции порошка NiCr20, состоящие из трех фракций с равномерным распределением по размерам частиц внутри каждой фракции при разных наборах диапазонов размеров фракций $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$.

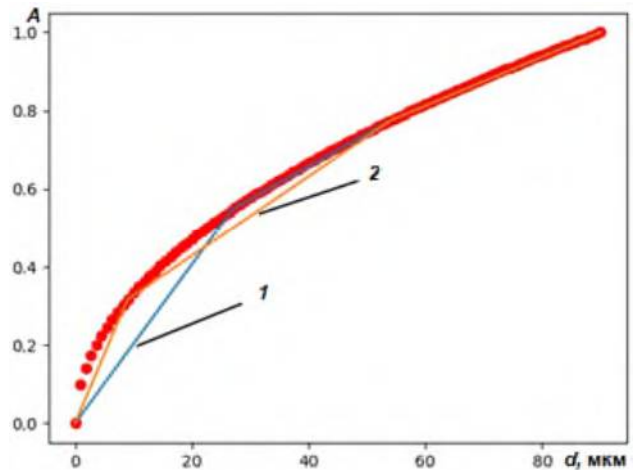


Рис. 4. Гранулометрические кривые распределений:

точки – теоретическое распределение по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; линии – три фракции с равномерным распределением по размерам частиц при разных диапазонах размеров:

1 – $[0 - 0,3d_{max}, 0,3d_{max} - 0,6d_{max}, 0,6d_{max} - d_{max}]$, $R^2 = 0,961$; 2 – $[0 - 0,1d_{max}, 0,1d_{max} - 0,6d_{max}, 0,6d_{max} - d_{max}]$, $R^2 = 0,986$

Как видно, функция 2 имеет более близкие значения к теоретической, так что для нее следует ожидать более плотной упаковки частиц.

Таким образом, при заданном наборе фракций порошка использование формул (6), (7) позволяет получать гранулометрическую кривую, наиболее близкую к теоретическому распределению.

Если объемы фракций композиции заданы, например, исходя из требуемых свойств композиции, то можно решить другую задачу – при заданных объемах фракций $\phi^i, i = 1 \dots N$ подобрать размеры частиц каждой фракции так, чтобы опытная функция распределения была наиболее близка к теоретической. В этом случае для нахождения размеров частиц каждой фракции d_{max}^i нужно решить систему нелинейных уравнений:

$$\sum_{j=0}^{N-i} \phi^j - A(n, d_{max}^i, d_{max}^i) = 0, \quad (8)$$

относительно переменных d_{max}^i . Опытную функцию распределения можно далее построить по формулам (7). Такую кривую целесооб-

разно назвать рациональной кривой распределения, подчеркнув этим, что она наиболее близка к оптимальной кривой просеивания при заданных объемных долях компонентов.

Для решения задачи (8) и построения кривой просеивания (7) в настоящей работе создано приложение на алгоритмическом языке Python с использованием библиотеки для математического моделирования Scipy.

В качестве примера рассмотрим построенные рациональные кривые распределения для композиции из трех компонентов (оксид алюминия, сплав NiCr, нитрид бора) с объемными долями, представленными списком: $\phi^1 = 0,34$, $\phi^2 = 0,21$, $\phi^3 = 0,45$, заданными на основании требований к физико-химическим свойствам. В результате расчета был получен следующий рациональный фракционный состав данной композиции (в квадратных скобках минимальные и максимальные размеры частиц фракции в мкм): оксид алюминия [39, 90], сплав NiCr [7, 39], нитрид бора [1, 7].

На рис. 5 приведена теоретическая гранулометрическая кривая и рассчитанное рациональное распределение.

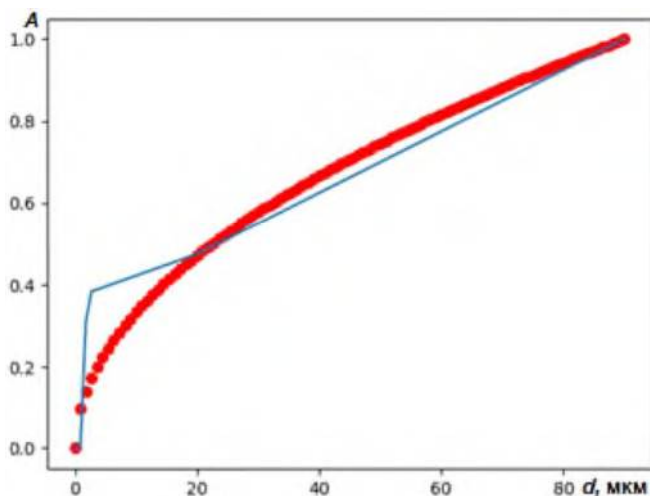


Рис. 5. Гранулометрические кривые распределений: точки – теоретическое распределение по уравнению (1) с показателем $n = 0,5$; линия – рациональное распределение для композиции с объемными долями компонентов $\phi^1 = 0,34, \phi^2 = 0,21, \phi^3 = 0,45, R^2 = 0,94$

В данном случае по значению R^2 видно, что данное распределение несколько хуже аппроксимирует теоретическую кривую по сравнению с распределениями, приведенными на рис. 5. Это связано с тем, что в данном случае распределение объемных долей компонентов не является оптимальным с точки зрения гранулометрического состава, а принято заданным, полученным в результате оптимизации свойств композиции.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема выбора функции распределения гранулометрического состава порошкообразной композиции для газотермического нанесения покрытий, обеспечивающая наиболее плотную упаковку частиц. Проведен сравнительный анализ теоретических распределений – оптимальных кривых просеивания, предложенных разными авторами.

Предложена методика решения задачи подбора фракционного состава порошкообразной композиции, наиболее близкого к теоретической кривой при заданных диапазонах размеров частиц фракций и при заданных объемных долях компонентов. Приведены примеры расчетов рационального фракционного состава композиции для газотермического нанесения покрытия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасун, А., Моригаки, О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.Н. Попова; Под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Кудинов, В.В., Бобров, Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
4. Davis, J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
5. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. – 360 с.
6. Sobolev K., Amirjanov A. The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model // Advanced Powder Technol. 2007. V. 18. No. 3. pp. 261-271.
7. Jia T., Zhang Y., Chen J.K. He Y.-L. Dynamic simulation of granular packing of fine cohesive particles with different size distributions // Powder Technology. 2012. V. 218. pp. 76-85.
8. Kalpana A., Neelavathi R., Narasimhulu K. Optimization of Aggregate Gradation and its effects on properties of normal strength concrete(M20) // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2019. V.6, No 7. pp. 1456-1465.
9. Liang Y., Cao, L., Liu J. et al. Numerical simulation of mechanical response of glacial tills under biaxial compression with the DEM // Bull Eng Geol Environ. 2019. V. 78. pp. 1575-1588.
10. Amirjanov A., Sobolev K. Optimization of A Computer Simulation Model for Packing of Concrete Aggregates // Particulate Science And Technology. 2008. V. 26(4). pp. 380-395.
11. Hwang C.L., Bui L.A.T., Chen C.T. Application of Fuller's ideal curve and error function to making high performance concrete using rice husk ash // Computers and Concrete. 2012. V. 10, No 6. pp. 631-647.
12. Tan B., Yang R. Application of Fractal Theory in Aggregate Gradation Research // Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 204-208. pp. 1923-1928.
13. Cui W., Wu K., Cai X., Tang H., Huang W. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course

Asphalt // Materials. 2020. V.13. pp. 189-204.

14. Wang Z., Liang Q., Yan F., Bian G. Strength improvement of cement emulsified asphalt mixture through aggregate gradation design // Construction and Building Materials. 2021. V. 299. 124018.

15. Fuller W.B., Thompson S.E. The Laws of Proportioning Concrete // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1907. V. 59. No 2. pp. 67-143.

REFERENCES

1. Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying / Transl. from Japanese V.N. Popova; Ed. V.S. Stepina, N.G. Shesterkin. M.: Mashinostroenie, 1985. 240 p.

2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Spray coating. Theory, technology and equipment. M.: Metallurgy, 1992. 432 p.

3. Thermal spraying / ed. L.H. Baldaev. M.: Market DS, 2007. 344 p.

4. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. – ASM International, 2004. 338 p.

5. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology. M.: Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2008. 360 p.

6. Sobolev K., Amirjanov A. The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model // Advanced Powder Technol. 2007. V. 18. No. 3. pp. 261-271

7. Jia T., Zhang Y., Chen J.K. He Y.-L. Dynamic simulation of granular packing of fine cohesive particles with different size distributions // Powder Technology. 2012. V. 218. pp. 76-85.

8. Kalpana A., Neelavathi R., Narasimhulu K. Optimization of Aggregate Gradation and its effects on properties of normal strength concrete(M20) // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2019. V.6. No 7. pp. 1456-1465.

9. Liang Y., Cao, L., Liu J. et al. Numerical simulation of mechanical response of glacial tills under biaxial compression with the DEM // Bull Eng Geol Environ. 2019. V. 78. pp. 1575-1588.

10. Amirjanov A., Sobolev K. Optimization of A Computer Simulation Model for Packing of Concrete Aggregates // Particulate Science And Technology. 2008. V. 26(4). pp. 380-395.

11. Hwang C.L., Bui L.A.T., Chen C.T. Application of Fuller's ideal curve and error function to making high performance concrete using rice husk ash // Computers and Concrete. 2012. V. 10, No 6. pp. 631-647.

12. Tan B., Yang R. Application of Fractal Theory in Aggregate Gradation Research //Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 204-208. pp. 1923-1928.

13. Cui W., Wu K., Cai X., Tang H., Huang W. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course Asphalt // Materials. 2020. V.13. pp. 189-204.

14. Wang Z., Liang Q., Yan F., Bian G. Strength improvement of cement emulsified asphalt mixture through aggregate gradation design //Construction and Building Materials. 2021. V. 299. 124018.

15. Fuller W.B., Thompson S.E. The Laws of Proportioning Concrete // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1907. V. 59. No 2. pp. 67-143.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 21.10.2022.

The article was submitted 11.08.2022; approved after reviewing 16.09.2022; assepted for publication 21.10.2022.

