

Структурные особенности асфальтобетонов при использовании капсул для самовосстановления

Сергей Сергеевич Иноземцев¹, Евгений Валерьевич Королев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В соответствии с широкой номенклатурой асфальтобетонных смесей, предусмотренной обновленной нормативной базой, содержание органической и минеральной части может быть различным и их влияние на капсулы, добавленные в стандартную органоминеральную систему, также может быть неодинаковым. Исследование направлено на установление граничных условий применения модификатора в виде капсул с восстанавливающим агентом в составе асфальтобетонных смесей с различным гранулометрическим составом и количеством битумного вяжущего.

Материалы и методы. Изучались зерновые составы минерального остова в соответствии с требованиями для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей по ГОСТ 31015–2002, ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58401.2–2019, а также горячих асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128–2013, ГОСТ Р 58406.2–2020 и ГОСТ Р 58401.1–2019.

Результаты. Предложен подход, который может быть использован для оценки пригодности асфальтобетонных смесей на этапе проектирования состава минеральной части с учетом геометрических размеров применяемого капсулированного модификатора. Количество капсул зависит от остаточной пористости проектируемых асфальтобетонов, что следует учитывать при подборе состава и уплотнении асфальтобетонной смеси.

Выводы. Необходимой структурой минерального каркаса для применения модификатора для самовосстановления в виде капсул с диаметром 1,1 мм обладают смеси на основе минерального остова с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2, SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. При некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул в смесях типа А, Б, В, А11Вт и SP-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самовосстановление, асфальтобетон, структура, модификатор, капсула, зерновой состав, пористость

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках Программы развития НИУ МГСУ на 2025–2036 годы при реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», а также финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иноземцев С.С., Королев Е.В. Структурные особенности асфальтобетонов при использовании капсул для самовосстановления // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 233–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.233-245

Автор, ответственный за переписку: Сергей Сергеевич Иноземцев, inozemtsevss@mail.ru.

Structural features of asphalt concrete when using capsules for self-healing

Sergey S. Inozemtcev¹, Evgeny V. Korolev²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Given the wide range of asphalt concrete mixtures covered by the updated regulatory framework, the organic and mineral content may vary, and their impact on capsules added to a standard organomineral system may also be variable. This study aims to establish the boundary conditions for the use of a modifier in the form of capsules containing a restoring agent in asphalt concrete mixtures with varying particle size distributions and bitumen binder contents.

Materials and methods. The particle size distribution of the mineral framework were studied in accordance with the requirements for stone-mastic asphalt concrete mixtures according to GOST 31015–2002, GOST R 58406.1–2020 and GOST R 58401.2–2019, as well as hot asphalt concrete mixtures according to GOST 9128–2013, GOST R 58406.2–2020 and GOST R 58401.1–2019.

Results. An approach is proposed that can be used to assess the suitability of asphalt concrete mixtures at the design stage of the mineral component, taking into account the geometric dimensions of the encapsulated modifier used. The number of capsules depends on the residual porosity of the designed asphalt concrete, which must be taken into account when selecting the composition and compacting the asphalt concrete mixture.

Conclusions. The required mineral framework structure for using the self-healing modifier in the form of capsules with a diameter of 1.1 mm is required for mixtures based on a mineral framework with a maximum size of at least 10 mm. Such mixtures include stone mastic asphalt concretes SHMA-20 and SHMA-15, which meet the requirements of GOST 31015; SHMA-22, SHMA-16, and SHMA-11, which meet the requirements of GOST R 58406.1; SMA-22 and SMA-16, which meet the requirements of GOST R 58401.2; as well as hot-mix asphalt concretes A22Vt and A16Vt, which meet the requirements of GOST R 58406.2; SP-32, SP-22, and SP-16, which meet the requirements of GOST R 58401.1. With some grain compositions, near the maximum permissible limit, voids may form in the frameworks with sufficient volume to accommodate capsules in mixtures of type A, type B, type B, A11Bt and SP-11.

KEYWORDS: self-healing, asphalt concrete, structure, modifier, capsule, grain size distribution, porosity

Acknowledgements. The research was conducted as part of development program for 2025–2036 of Moscow State University of Civil Engineering under the framework of strategic academic leadership program “Priority 2030” and was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2026-0003.

FOR CITATION: Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Structural features of asphalt concrete when using capsules for self-healing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):233-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.233-245 (rus.).

Corresponding author: Sergey S. Inozemtcev, inozemtsevss@mail.ru.

*Только в конце работы становится ясно,
с чего надо было начать.*

Блез Паскаль

ВВЕДЕНИЕ

Формирование структуры асфальтобетона, способной сопротивляться воздействиям транспорта и погоднo-климатических факторов, — основное условие длительного срока эксплуатации дорожного покрытия автомобильной дороги. Эксплуатационная стойкость структуры асфальтобетона обуславливается качеством и количеством материалов, применяемых для его производства [1–10]. Развитие технологии асфальтобетонов приводит к усложнению компонентного состава смесей за счет использования новых функциональных модификаторов, регулирующих технологические свойства и позволяющих получать материал с уникальным сочетанием характеристик.

Использование модификаторов дает возможность увеличивать стойкость асфальтобетонов к воздействию повышенных температур, что положительно влияет на способность сопротивляться динамическим нагрузкам и образованию колес в летний период эксплуатации [5–7]. Сокращение чувствительности к пониженным температурам позволяет снизить хрупкость асфальтобетонов, что обеспечивает способность сопротивляться трещинообразованию в зимний период эксплуатации [8–10]. Однако для материала на органическом вяжущем улучшение высокотемпературных и низкотемпературных свойств является задачей поиска компромиссных решений (рис. 1).

Таким образом, для обеспечения большей стойкости к эксплуатационным факторам требуется достижение баланса между упруго-пластичными и хрупкими

свойствами материала. С этим связан поиск исследователями таких решений, которые позволят получить материал с необходимым качеством с учетом требований потребителя (комфортность при эксплуатации, срок службы) и нормативных требований (показатели свойств). Одним из таких решений служит применение модификаторов, обеспечивающих способность асфальтобетонов к самовосстановлению в период эксплуатации.

Реализация самовосстановления в асфальтобетонах достигается за счет ресурсного потенциала, формируемого находящимся в составе материала специальным модификатором в виде капсул с восстанавливающим агентом [11–15]. Капсулы в асфальтобетоне являются элементом структуры, который закономерно оказывает влияние на структурообразование (физические и химические свойства поверхности) и параметры структуры материала (изменение

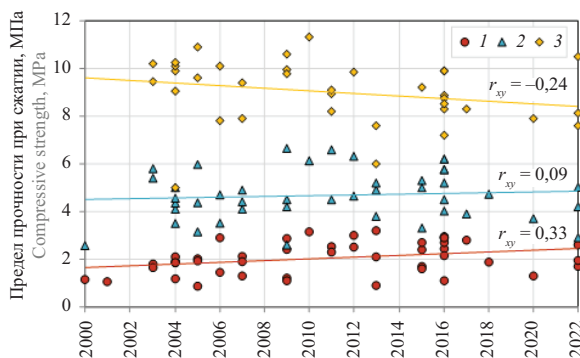


Рис. 1. Изменение значений предела прочности при сжатии при температуре 50 °C (1); 20 °C (2); 0 °C (3) в исследованиях с 2000 по 2022 г.

Fig. 1. Change in the values of compressive strength at a temperature of 50 °C (1); 20 °C (2); 0 °C (3) in studies from 2000 to 2022

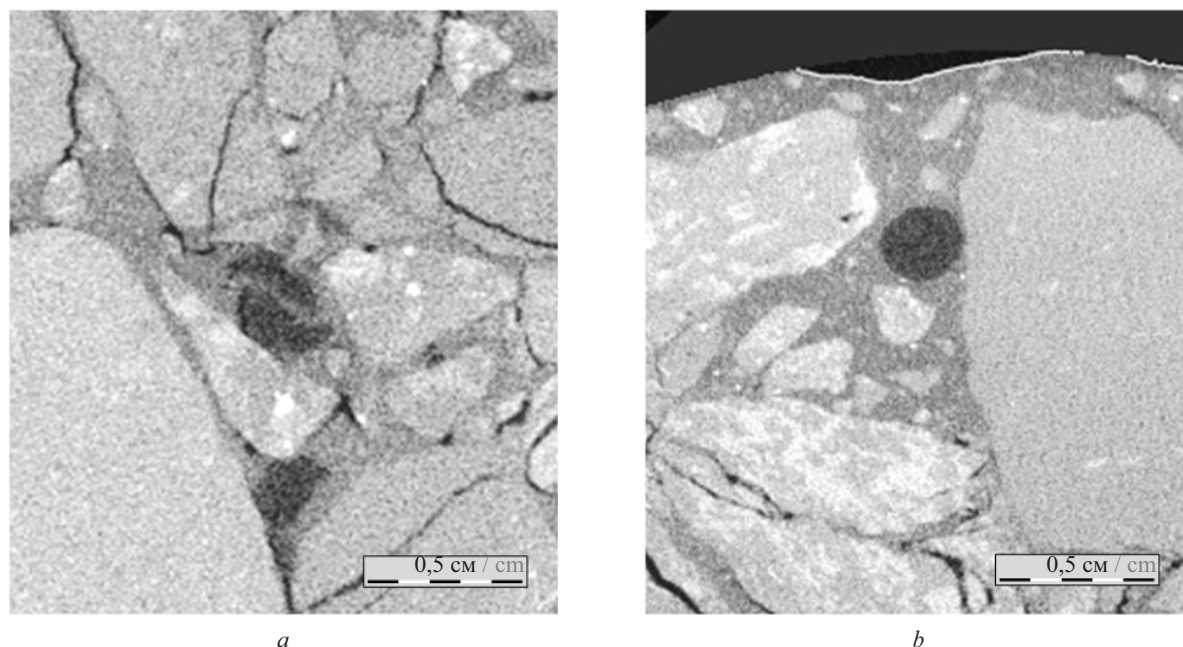


Рис. 2. Томографические изображения структуры асфальтобетона с преждевременным разрушением капсул (а) и сохранностью капсул (б)

Fig. 2. Tomographic images of the structure of asphalt concrete with premature destruction of capsules (a) and preservation of capsules (b)

геометрических характеристик структуры: содержания компонентов, толщины слоя битума и т.д.). Назначение оболочки капсул заключается в сохранении восстанавливающего агента от участия в процессах структурообразования до момента образования дефектов в асфальтобетоне. Поэтому чрезмерное воздействие других структурных элементов может приводить к негативному влиянию на капсулы, например их преждевременному разрушению. Это возможно на этапе производства асфальтобетонной смеси и ее уплотнения при укладке в дорожное покрытие (рис. 2).

В соответствии с широкой номенклатурой асфальтобетонных смесей, предусмотренной обновленной нормативной базой, содержание органической и минеральной части может быть различным и их влия-

ние на капсулы, добавленные в стандартную органоминеральную систему, также может быть неодинаковым [12–19]. Ранее доказано [20], что в ЦМА-15 сохранность¹ капсул после уплотнения асфальтобетонной смеси достигает 97 % кальций-алгинатных капсул (рис. 3).

Для других типов смесей сохранность капсул может быть меньше в зависимости от структуры, формируемой в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси. Сохранность капсул в структуре асфальтобетона зависит от функции каждого компонента смеси. Так, в минеральном остове зерна щебня и крупного песка

¹ Сохранность — доля капсул, сохранивших целостность после всех технологических воздействий по приготовлению и уплотнению асфальтобетонной смеси.

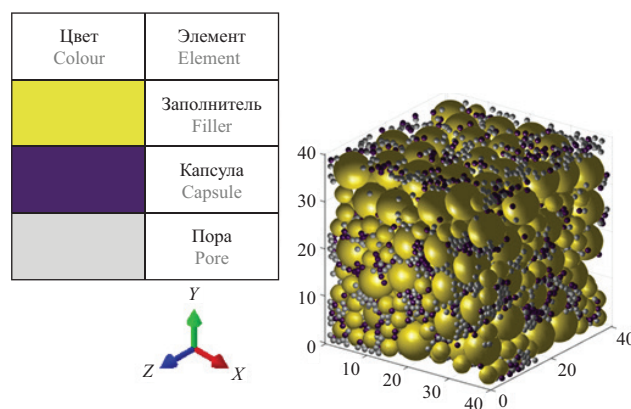


Рис. 3. Модель распределения элементов структуры в асфальтобетоне [20]

Fig. 3. Model of distribution of structural elements in asphalt concrete [20]

участвуют в формировании жесткого пространственного каркаса, которые при контакте друг с другом в процессе уплотнения образуют зоны наибольшего механического напряжения [21, 22]. При попадании в такие зоны капсулы испытывают большие нагрузки и могут быть разрушены.

Мелкие фракции песка и минерального наполнителя совместно с битумом образуют асфальтовое вяжущее вещество, которое заполняет пространство между зернами жесткого пространственного каркаса. Через асфальтовое вяжущее на капсулы воздействует значительно меньшее давление в результате его распределения. Это способствует большей сохранности капсул в такой среде при уплотнении.

Цель исследования — установление граничных условий применения модификатора в виде капсул с восстанавливающим агентом в составе асфальтобетонных смесей с различным гранулометрическим составом и количеством битумного вяжущего.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались зерновые составы минерального остова в соответствии с требованиями для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей по ГОСТ 31015–2002, ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58401.2–2019, а также горячих асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128–2013, ГОСТ Р 58406.2–2020 и ГОСТ Р 58401.1–2019. Рассматривались особенности структуры получаемых смесей и асфальтобетонов с учетом общего содержания пустот в заполнителе (ПМЗ), заполненных битумом (ПНБ), общей объемной плотности минерального заполнителя, остаточной пористости.

Относительный объем пустот, заполненных битумом, определяется в соответствии с формулой:

$$\text{ПНБ} = \frac{\text{ПМЗ} - P_a}{\text{ПМЗ}} \cdot 100, \quad (1)$$

где P_a — общее количество пор в асфальтобетоне (остаточная пористость), %.

Пустоты в минеральном заполнителе рассчитываются следующим образом:

$$\text{ПМЗ} = \frac{1 - G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} \cdot 100, \quad (2)$$

где G_{mb} — объемная плотность асфальтобетона (принята для расчета 2,4 г/см³); $P_s = 1$ — объемное количество минерального заполнителя в асфальтобетонной смеси; G_{sb} — общая объемная плотность минерального заполнителя, входящего в состав асфальтобетонной смеси, г/см³. Общая объемная плотность минерального заполнителя определяется с использованием формулы:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1/G_1 + P_2/G_2 + \dots + P_n/G_n}, \quad (3)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n — количество в асфальтобетонной смеси каждого отдельного минерального заполнителя, %; G_1, G_2, \dots, G_n — объемные плотности каждо-

го отдельного минерального заполнителя, входящего в состав асфальтобетонной смеси, г/см³.

В качестве капсулированного модификатора для самовосстановления асфальтобетонов рассматривались кальций-альгинатные капсулы с диаметром 1,1 мм, максимальной разрушающей силой не менее 16 Н и содержащие восстанавливающий агент не менее 90 % от общего объема [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обеспечение сохранности капсул в структуре асфальтобетона после уплотнения смеси достигается выполнением двух основных условий:

- формированием минерального каркаса с минимальной концентрацией зон высокого механического напряжения;
- достаточным количеством асфальтового вяжущего вещества.

Условием формирования минерального каркаса, в котором капсулы не разрушатся, является создание структуры, где капсулы не нарушают естественную упаковку зерен и не выступают в качестве элемента скелета.

Рассматривая кубическую и гранецентрированную упаковку монодисперсных зерен сферической формы диаметром D , размер пустоты между частицами, где может разместиться дополнительный элемент без раздвижки зерен, составляет $0,414 \cdot D$ и $0,155 \cdot D$ соответственно (рис. 4).

В таком случае значением, характеризующим границу размерности включений, влияющих на упаковку зерен минерального каркаса, является $0,285 \cdot D$. Таким образом, если капсула диаметром $d_c < 0,285 \cdot D$ добавляется в смесь, то она свободно размещается в межзерновом пространстве и находится в объеме, окруженная битумом и мелкими частицами минеральной части, с распределенным давлением от уплотнения смеси. В случае, если диаметр капсулы $d_c \geq 0,285 \cdot D$, то капсула становится элементом минерального каркаса, встраиваясь в цепочку контактов зерен, через которые воспринимаются сжимающие и сдвиговые нагрузки с дальнейшей концентрацией напряжений. В результате капсула может быть разрушена.

Следует учитывать, что минеральный состав асфальтобетонной смеси состоит из полидисперсной смеси, состоящей из зерен угловатой формы, которые укладываются в нерегулярный порядок. При этом для различных типов асфальтобетонных смесей минимальный размер зерен минерального каркаса будет отличаться. Размер пустот в минеральном каркасе зависит от расстояния между частицами, которое рассчитывается на основе формулы [23–25]:

$$h \approx \frac{\langle d^3 \rangle - \langle d^2 \rangle^{3/2}}{\langle d^2 \rangle}, \quad (4)$$

где $\langle d^2 \rangle$ и $\langle d^3 \rangle$ — средневзвешенное значение диаметра частиц в полифракционной смеси с показателем

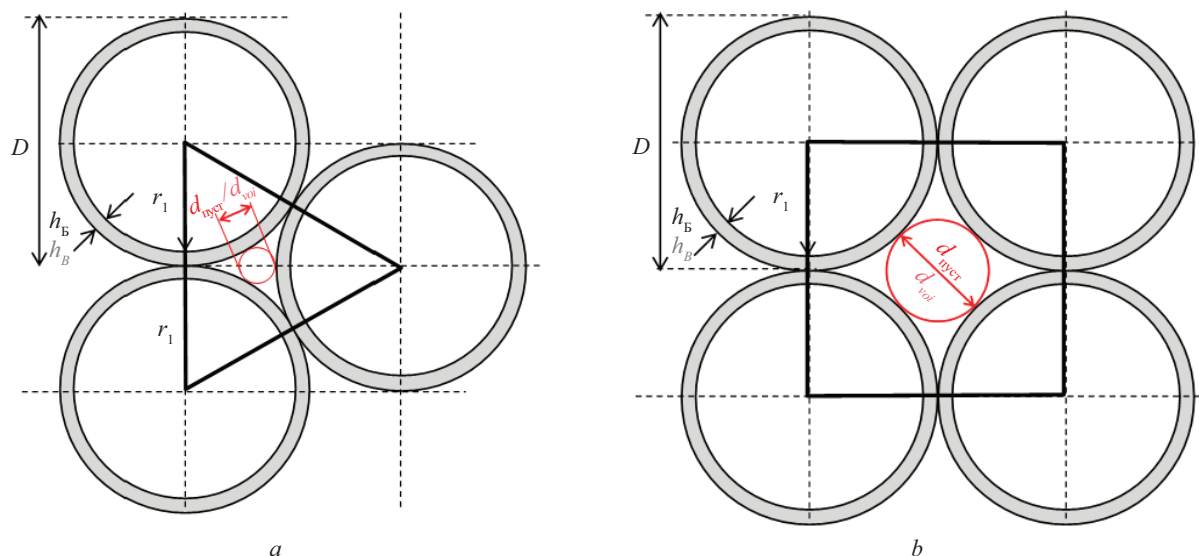


Рис. 4. Модель расчета размеров для размещения капсул в зерновом остове для гранецентрированной кубической (а) и кубической упаковки зерен (b)

Fig. 4. MModel for calculating the dimensions for placing capsules in a grain core for face-centered cubic (a) and cubic grain packing (b)

степени два и три соответственно; $\langle d^n \rangle = \sum f_i \cdot d_i^n$; f_i — объемная доля зерен с диаметром d_i .

Числитель формулы пропорционален свободному объему в упаковке частиц, а знаменатель — суммарной поверхности частиц. В идеальной системе средний радиус пустот или полости, где может разместиться капсула, $0,5 \cdot h$, тогда для асфальтобетонной смеси этот размер будет значительно меньше. Отсюда радиус пустот или допустимый размер капсул в асфальтобетонной смеси будет равен:

$$r_{\text{пуст}} = k \frac{\langle d^3 \rangle - \langle d^2 \rangle^{3/2}}{\langle d^2 \rangle}, \quad (5)$$

для которого k зависит от нескольких параметров:

$$k = k_{\text{poly}} \cdot k_{\text{form}} \cdot k_{\text{bit}} \cdot k_{\text{pack}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{poly}}, k_{\text{form}}, k_{\text{bit}}, k_{\text{pack}} < 1,0$ — коэффициенты, учитывающие полидисперсность зернового состава, несферичность формы зерен, наличие битума в системе, неоднородность упаковки соответственно.

Коэффициент полидисперсности может быть рассчитан с использованием среднечисленного диаметра d_n и среднемассового (или среднеобъемного) диаметра d_w [26, 27]:

$$k_{\text{poly}} = d_n / d_w, \quad (7)$$

для которого:

$$d_n = \sum f_n d_n, \quad (8)$$

где $f_n = n_i / \sum n_i$ — доля i -й фракции (диаметром d_i); n_i — количество частиц i -й фракции;

$$d_w = \sum f_{wi} d_i^3, \quad (9)$$

где $f_{wi} = n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^3$ — массовая (объемная) доля i -й фракции (диаметром d_i).

Согласно исследованиям [28, 29], коэффициент формы для сферических частиц $k_{\text{form}} = 1$, а для округлой и угловатой формы частиц, которая характерна для зерен заполнителя асфальтобетонов, $k_{\text{form}} = 0,77$ и $k_{\text{form}} = 0,66$, соответственно. Наличие низкокачественных зерен продолговатой и пластинчатой формы снижает k_{form} до значений 0,58 и 0,43 соответственно.

Очевидно, что введение битума в минеральную часть способствует уменьшению объема пустот V_0 до некоторого значения V_1 , который с учетом допущения об их сферичной форме [29] связан с их радиусом зависимостью $r^3 \propto V$ или $r \propto V^{1/3}$. Тогда изменение размера пустот будет определяться с учетом пустот, заполненных битумом ПНБ [30]:

$$k_{\text{bit}} = \frac{r_1}{r_0} = \sqrt[3]{\frac{V_1}{V_0}} = \sqrt[3]{1 - \text{ПНБ}}. \quad (10)$$

Пустотность минеральной части в асфальтобетонной смеси в среднем равна 12–18 %, что позволяет применять коэффициент упаковки зерен k_{pack} от 0,82 до 0,88.

Таким образом, для типов асфальтобетонных смесей могут быть определены структурные параметры, позволяющие судить о возможности использования капсул, такие как среднее число контактов на одно зерно и средний размер пустот между зернами. Некоторые показатели свойств стандартных асфальтобетонных смесей представлены в табл. 1.

С использованием формулы (5) произведена оценка исследуемых асфальтобетонных смесей по показателю $d_{\text{пуст}} = 2 \cdot r_{\text{пуст}}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ структурных особенностей различных видов асфальтобетонных смесей, зерновой состав

Табл. 1. Физические показатели свойства стандартных асфальтобетонных смесей

Table 1. Physical properties of standard asphalt concrete mixtures

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Количество зерен остова, % по объему Content of carcass grains, % by volume	Количество контактов на зерно Number of contacts per grain	Остаточная пористость, % Pore volume, %	Пустоты, заполненные битумом*, % Voids filled with bitumen*, %
ЩМА-20 / SMA-20	31015	75–83	3,0	1,5–4,5	73,0–85,0
ЩМА-15 / SMA-15		72–82	3,3	1,5–4,5	73,0
ЩМА-10 / SMA-10		71–79	4,0	1,5–4,5	73,0–89,3
ЩМА-22 / SMA-22	58406.1	65–80	2,9	2,0–6,0	63,3–63,5
ЩМА-16 / SMA-16		60–77	3,3	2,0–6,0	63,2–63,5
ЩМА-11 / SMA-11		60–75	3,8	2,0–5,5	65,4–65,8
ЩМА-8 / SMA-8		55–75	4,3	1,5–5,0	69,8–70,3
SMA-22	58401.2	72–82	3,3	3,7–4,3	63,5–63,8
SMA-16		73–81	3,8	3,7–4,3	63,7–63,8
SMA-11		65–80	4,6	3,7–4,3	63,3–63,8
SMA-8		71–81	2,8	3,7–4,3	63,7–63,8
Тип А / Type А	9128	62–72	4,7	2,5–5,0	65,2–65,3
Тип Б / Type В		52–62	5,3	2,5–5,0	64,9–65,0
Тип В / Type С		40–52	6,1	2,5–5,0	64,5
A22B _т / A22U _н	58406.2	42–63	4,6	2,5–5,0	61,5–61,6
A16B _т / A16U _н		42–63	5,3	2,5–4,5	64,0–64,2
A11B _т / A11U _н		42–63	5,8	2,5–4,5	64,0–64,2
SP-32	58401.1	10–60	4,5	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-22		10–55	5,4	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-16		10–52	6,5	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-11		10–42	8,0	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-8		10–34	11,1	3,7–4,3	57,6–58,5
SP-4		0–10	20,4	3,7–4,3	57,6–58,5

Примечание: * — рассчитано для плотности асфальтобетона $G_{mb} = 2,4 \text{ г/см}^3$.

Note: * — calculated for asphalt concrete density $G_{mb} = 2.4 \text{ g/cm}^3$.

Табл. 2. Результаты расчета параметров структуры минерального каркаса асфальтобетонов

Table 2. Results of calculation of parameters of the structure of the mineral framework of asphalt concrete

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Значение параметров Parameters value					
		k_{poly}	k_{form}	k_{bit}	k_{pack}	k	$d_{пуст}$, мм $d_{вор}$, mm
ЩМА-20 / SMA-20	31015	0,62–0,75	0,66	0,65	0,84	0,22–0,27	1,24–1,53
ЩМА-15 / SMA-15		0,61–0,68	0,66	0,65	0,84	0,22–0,24	1,16–1,20
ЩМА-10 / SMA-10		0,68–0,78	0,66	0,65	0,84	0,24–0,28	0,52–0,66
ЩМА-22 / SMA-22	58406.1	0,58–0,66	0,66	0,72	0,84	0,23–0,26	2,07–2,08
ЩМА-16 / SMA-16		0,56–0,63	0,66	0,72	0,84	0,22–0,25	1,51–1,61
ЩМА-11 / SMA-11		0,58–0,63	0,66	0,70	0,84	0,23–0,25	1,43–1,54
ЩМА-8 / SMA-8		0,60–0,70	0,66	0,67	0,84	0,22–0,26	0,93–1,00
SMA-22	58401.2	0,52–0,68	0,66	0,71	0,84	0,21–0,27	1,87–2,01
SMA-16		0,59–0,69	0,66	0,71	0,84	0,23–0,27	1,21–1,37
SMA-11		0,62–0,67	0,66	0,71	0,84	0,25–0,27	0,86–1,01
SMA-8		0,57–0,77	0,66	0,71	0,84	0,23–0,30	0,78–0,96
Тип А / Type А	9128	0,51–0,61	0,66	0,70	0,84	0,20–0,24	0,81–1,88
Тип Б / Type В		0,43–0,52	0,66	0,71	0,84	0,17–0,20	0,87–1,89
Тип В / Type С		0,38–0,41	0,66	0,71	0,84	0,15–0,16	0,88–1,92

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Вид смеси Type of mixture	ГОСТ Standard	Значение параметров Parameters value					
		k_{poly}	k_{form}	k_{bit}	k_{pack}	k	$d_{пуст}$, мм $d_{воп}$, мм
A22B _T / A22U _H	58406.2	0,37–0,46	0,66	0,73	0,84	0,15–0,19	2,00–2,64
A16B _T / A16U _H		0,36–0,48	0,66	0,71	0,84	0,16–0,19	1,39–1,89
A11B _T / A11U _H		0,45–0,51	0,66	0,71	0,84	0,18–0,20	1,24–0,98
SP-32	58401.1	0,37–0,46	0,66	0,75	0,84	0,17–0,28	2,47–3,11
SP-22		0,39–0,48	0,66	0,75	0,84	0,17–0,27	1,80–2,36
SP-16		0,45–0,51	0,66	0,75	0,84	0,17–0,26	1,30–1,74
SP-11		0,41–0,67	0,66	0,75	0,84	0,16–0,23	0,96–1,31
SP-8		0,40–0,64	0,66	0,75	0,84	0,15–0,20	0,60–0,96
SP-4		0,40–0,62	0,66	0,75	0,84	0,13–0,23	0,32–0,79

Примечание: диапазоны используются для составов зерновых материалов, равных допустимой нижней и верхней границе в соответствии со стандартом.

Note: ranges are used for grain compositions equal to the permissible lower and upper limits in accordance with the standard.

которых регламентируется государственным стандартами из разных систем проектирования, показывает, что эти смеси обладают необходимой структурой для размещения капсул для самовосстановления с диаметром 1,1 мм только при использовании заполнителя с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2; SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. Важно отметить смеси типа А, Б, В, А11Вт и SP-11, в которых при некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул.

Анализ нормативных требований к гранулометрическому составу асфальтобетонных смесей обеспечил установление границы концентраций различных фракций минеральных компонентов, с помощью которых формируется минеральный каркас с пустотами между зернами, в которых могут размещаться капсулы для самовосстановления асфальтобетона. Графически гранулометрические составы асфальтобетонных смесей показаны на рис. 5.

Анализ гранулометрических составов показывает, что для асфальтобетонных смесей в допустимых пределах в соответствии со стандартами может быть подобрана минеральная смесь как пригодная для использования капсул (с диаметром 1,1 мм), так и состав, где они будут разрушаться при уплотнении. Может быть предложена рецептурная граница зерновых составов для таких смесей, относительно которой осуществляется оценка их пригодности для реализации технологии самовосстановления.

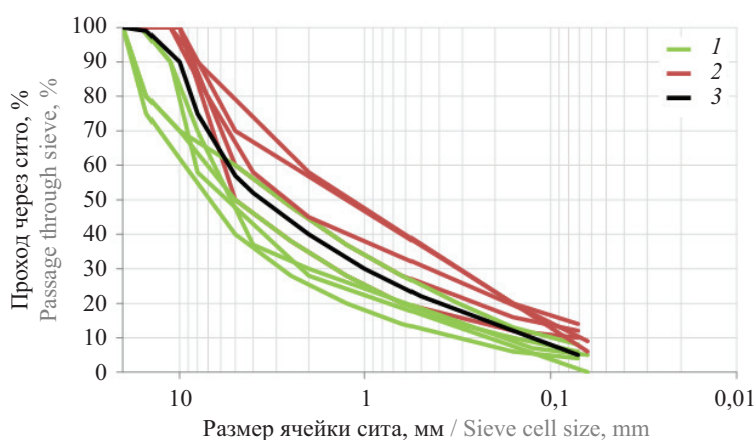


Рис. 5. Гранулометрические составы асфальтобетонных смесей с размером пустот: 1 — $d_{пуст} > 1,1$ мм; 2 — $d_{пуст} < 1,1$ мм; 3 — условная граница

Fig. 5. Particle size distribution of asphalt concrete mixtures with void sizes: 1 — $d_{voi} > 1.1$ mm; 2 — $d_{voi} < 1.1$ mm; 3 — conditional boundary

Табл. 3. Гранулометрический состав контрольной асфальтобетонной смеси

Table 3. Particle size distribution of the control asphalt concrete mixture

Проход зерен размером мельче соответствующей ячейки сита (мм), % Grain composition finer than a sieve mesh (mm), %												
20	15(16)	10(11,2)	8	5	4	2,5	2,0	1,0	0,63	0,316	0,16	0,071
100	99	90	75	57	52	44	40	30	23	14	9	5

Гранулометрический состав контрольной смеси представлен в табл. 3.

Полученная граница может быть использована для подбора состава минеральной части асфальтобетонной смеси, содержащей капсулы с восстанавливающим агентом, диаметр которых равен 1,1 мм. Для капсул других размеров граница зернового состава должна быть уточнена.

Стоит отметить, что оптимальная структура асфальтобетона после уплотнения смеси характеризуется остаточной пористостью, которая регламентируется соответствующим стандартом. При этом добавление в состав асфальтобетонной смеси капсул с восстанавливающим агентом приводит к тому, что они могут занимать объем межзерновых пустот, уменьшая остаточную пористость (при постоянном расходе битума

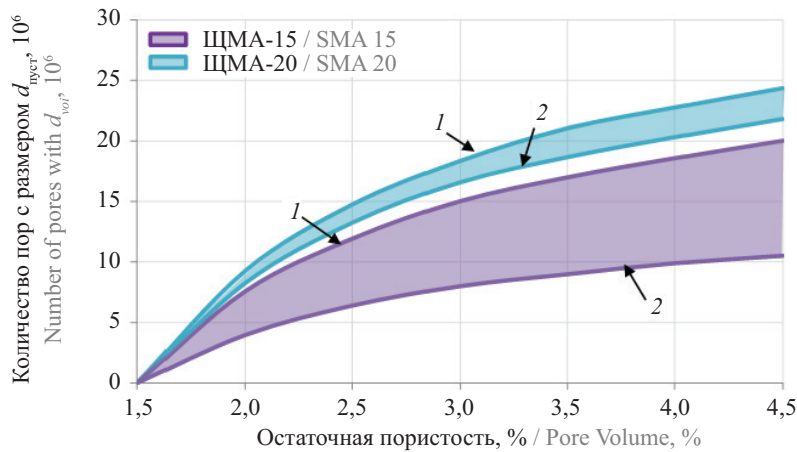


Рис. 6. Зависимость количества пор для 1 м³ ЩМА от остаточной пористости: 1 — для нижней границы зернового состава; 2 — для верхней границы зернового состава

Fig. 6. Dependence of the number of pores for 1 m³ of SMA on the residual porosity: 1 — for the lower boundary of the grain composition; 2 — for the upper boundary of the grain composition

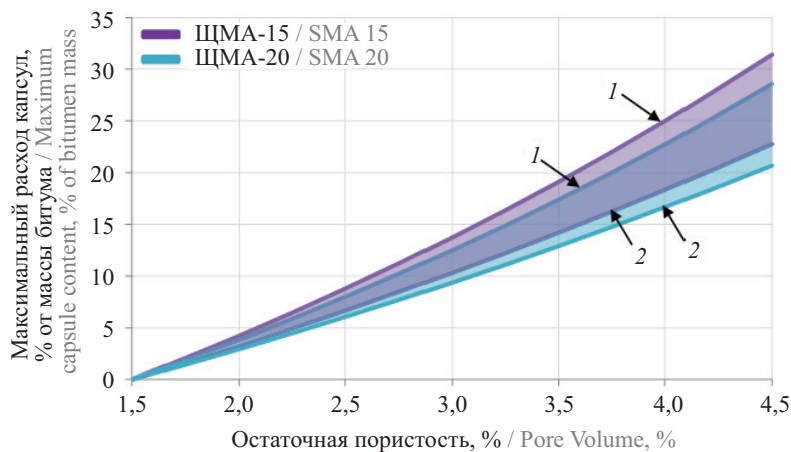


Рис. 7. Зависимость максимального расхода капсул на 1 м³ ЩМА от остаточной пористости: 1 — ПМЗ = 15 %; 2 — ПМЗ = 19 %

Fig. 7. Dependence of the maximum consumption of capsules per 1 m³ of SMA on the residual porosity: 1 — Voidness = 15 %; 2 — Voidness = 19 %

и минерального порошка). Это предполагает условие, что количество пор, объем которых может быть занят капсулами, ограничено минимально возможной остаточной пористостью, что показано на примере ЩМА (рис. 6).

При достижении остаточной пористости 1,5 % в структуре ЩМА-15 не остается пор с размером $d_{\text{пуст}}$, которые могут быть заняты капсулами, что будет приводить к их вытеснению и возможному разрушению зернами заполнителя при уплотнении асфальтобетонной смеси. На рис. 6 видно, что в нормируемых пределах увеличение остаточной пористости является условием увеличения количества пор, пригодных заполнить капсулами с диаметром 1,1 мм. Максимальный расход капсул (% от массы битума) может быть рассчитан по формуле:

$$C_{\text{кап, макс}} = \frac{\rho_{\text{кап}} (V \cdot P_a - 100 \cdot V_{n, \text{min}})}{\rho_6 \cdot V \cdot (\text{ПМЗ} - P_a)}, \quad (11)$$

где ρ_6 и $\rho_{\text{кап}}$ — плотность битума и капсул с восстанавливающим агентом соответственно, кг/м³ (в расчете использовано $\rho_6 = 1000$ кг/м³ и $\rho_{\text{кап}} = 1100$ кг/м³);

$V_{n, \text{min}} = \frac{V \cdot \text{ПМЗ}}{100} \left(1 - \frac{1 - P_{a, \text{min}}}{\text{ПМЗ}} \right)$ — минимальный объем

пор в асфальтобетоне, м³, на объем асфальтобетона $V = 1$ м³ в соответствии со стандартом (в расчете использовано $P_{a, \text{min}} = 1,5$ %).

Это условие может быть применено при проектировании состава асфальтобетона, обладающего самовосстановлением [31], которое обеспечивается введением капсул, содержащих восстанавливающий агент (рис. 7). На рис. 7 видно, что увеличение остаточной пористости на каждый 1 % увеличивает потенциальный расход капсул с $d_{\text{пуст}}$ на 7–10 %. Этот результат позволяет осуществлять оптимизацию количества капсул в смеси по показателям эффективности самовосстановления.

Таким образом, при подборе состава асфальтобетонных смесей, модифицированных капсулами с восстанавливающим агентом, можно использовать

разработанный подход, предполагающий установление размера пустот, в которых способны разместиться капсулы без нарушения структуры, а также расчет максимального расхода капсул.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимой структурой минерального каркаса для применения модификатора для самовосстановления в виде капсул с диаметром 1,1 мм обладают смеси на основе минерального остова с максимальной крупностью не менее 10 мм. К таким смесям относятся щебеночно-мастичные асфальтобетоны ЩМА-20 и ЩМА-15, отвечающие требованиям ГОСТ 31015; ЩМА-22, ЩМА-16 и ЩМА-11, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.1; SMA-22 и SMA-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.2; а также асфальтобетоны из горячих смесей А22Вт и А16Вт, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2; SP-32, SP-22 и SP-16, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58401.1. При некоторых зерновых составах вблизи максимально допустимой границы могут формироваться пустоты в каркасах с достаточным объемом для размещения капсул в смесях типа А, Б, В, А11Вт и SP-11.

Предложен подход, который возможно использовать для оценки пригодности асфальтобетонных смесей на этапе проектирования состава минеральной части с учетом геометрических размеров применяемого капсулированного модификатора. Количество капсул зависит от остаточной пористости проектируемых асфальтобетонов, что следует учитывать при подборе состава и уплотнении асфальтобетонной смеси.

Повышение остаточной пористости является условием увеличения количества пор, пригодных заполнить капсулами с диаметром 1,1 мм, для которых может быть рассчитан максимальный расход капсул (% от массы битума) с помощью формулы:

$$C_{\text{кап, макс}} = \frac{\rho_{\text{кап}} (V \cdot P_a - 100 \cdot V_{n, \text{min}})}{\rho_6 \cdot V \cdot (\text{ПМЗ} - P_a)}.$$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шило О.А. Обоснование требований к эксплуатационным свойствам асфальтобетонов верхних слоев оснований по показателю усталостной прочности // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 74–83. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.007. EDN YFSAPT.

2. Миронов Н.С., Чернов С.А. Определение эффективности влияния различных адгезионных добавок на эксплуатационные показатели свойств асфальтобетона // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4 (100). С. 532–553. EDN HUKJTC.

3. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Мавлиев Л.Ф., Буланов Н.Е. Современные методы оценки эксплуатационных свойств дорожных асфальтобетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (39). С. 279–285. EDN YIOBBV.

4. Котлярский Э.В., Кочнев В.И., Давлятова Д.Ю. Блок учета характеристик исходных материалов при автоматизированном проектировании асфальтобетонных смесей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 33–38. EDN RPJPIR.

5. Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Прибылов В.С., Мурко В.В. Асфальтовые бетоны с использованием отходов обогатительных предприятий угольной промышленности Кузбасса // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 2 (65). С. 44–49. EDN VJJWHN.
6. Ядыкина В.В., Кузнецова Е.В., Лебедев М.С. Изменение свойств асфальтобетона при использовании гидрофобизированного минерального порошка // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23. EDN AQJHRL.
7. Гладких В.А., Королёв Е.В., Альбакасов А.И. Исследование вязкости серобитумных вяжущих // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 72–76. EDN ZTTDQH.
8. Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Буянтуев С.Л., Доржиева Е.В. Использование углеродных наноматериалов для получения эффективного дорожно-строительного композита // Вестник ВСГУТУ. 2014. № 6 (51). С. 67–72. EDN TFLAVX.
9. Лесовик В.С., Денисов В.П., Кабалин М.Д., Высоцкая М.А. Обоснование выбора асфальтогранулобетонных смесей типов М и К с позиции совместной работы слоев основания и покрытия дорожной одежды // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 51–62. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6. EDN HJQTES.
10. Небратенко Д.Ю., Жемерикин А.Н., Лямкин Д.И. Исследование свойств крупнотоннажных продуктов лесохимии как пластификаторов дорожных битумов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 1. С. 73–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.73-83. EDN XQLZMT.
11. Руденский А.В. О контроле качества асфальтобетона при строительстве дорожных покрытий // Мир дорог. 2020. № 133. С. 75–77. EDN BJAEEU.
12. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 1. P. 168. DOI: 10.3390/ma12010168
13. Al-Mansoori T., Micaelo R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1091–1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137
14. Prasetial M.S., Djakfar L., Wisnumurti W., Sabarudin A. The Effect of Calcium Alginate Capsule on Resilience Modulus of Buton Rock Asphalt-Based Self-Healing Mixtures // Civil Engineering and Architecture. 2023. Vol. 11. Issue 6. Pp. 3249–3259. DOI: 10.13189/cea.2023.110601
15. Yu X., Liu Q., Wan P., Song J., Wang H., Zhao F. et al. Effect of Ageing on Self-Healing Properties of Asphalt Concrete Containing Calcium Alginate/Attapulgite Composite Capsules // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 4. P. 1414. DOI: 10.3390/ma15041414
16. Носов С.В. Альтернатива системе Superpave при формировании региональных дорожных НИИ // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4 (60). С. 87–96. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.009 EDN SHLPGN.
17. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. Принципы формирования оптимальной структуры асфальтобетона // Фундаментальные исследования. 2012. № 11–1. С. 124–128. EDN PKWJSP.
18. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 8–14. DOI: 10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444. EDN VVZUTB.
19. Иноземцев С.С., Сусанина Т.В., Стибунов Д.В., Кейта М.Л.Ф. Тенденции развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов в России // Строительные материалы. 2023. № 12. С. 4–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19. EDN DYTPSR.
20. Inozemtcev S., Jelagin D., Korolev E., Fadil H., Partl M.N., Trong D.T. Experimental and numerical study on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent // Materials and Structures. 2022. Vol. 55. Issue 9. DOI: 10.1617/s11527-022-02059-8
21. Белицкий В.Д., Катунин А.В. Тезаурус математических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 18–21. EDN RSSITT.
22. 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. № 1 (45). С. 181–221. EDN NLXXIP.
23. Rumpf H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft // Chemie Ingenieur Technik. 1965. Vol. 37. Issue 3. Pp. 187–202. DOI: 10.1002/cite.330370303
24. Rumpf H., Gupte A.R. Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenstromung // Chemie Ingenieur Technik. 1971. Vol. 43. Issue 6. Pp. 367–375. DOI: 10.1002/cite.330430610
25. Rumpf H. Particle Technology. Springer Netherlands, 1990. DOI: 10.1007/978-94-011-7944-7
26. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учебное пособие. М. : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2012. 56 с. EDN YKYHDV.
27. Придатко Ю.М., Королев Л.В., Готовцев В.М. Моделирование плотной упаковки частиц композитного материала // Вестник Саратовского

государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 4 (62). С. 96–100. EDN QINUXJ.

28. Патент RU № 2245740 С1. Способ обогащения горной массы месторождений тяжелых металлов / Держаков Б.П.; заявл. № 2003136938/03 от 24.12.2003; опубл. 10.02.2005.

29. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации : учебное пособие. 2-е изд. М. : МАКС Пресс, 2017. 88 с. EDN ZEFANH.

30. Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Smirnov V.A. Nanomodified bitumen composites: solvation shells and rheology // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2016. Pp. 405–410. DOI: 10.1201/b19693-85

31. Jwaida Z., Dulaimi A., Mydin M.A.O., Kadhim Y.N., Al-Busaltan S. The self-healing performance of asphalt binder and mixtures : a state-of-the-art review // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024. Vol. 9. Issue 7. DOI: 10.1007/s41062-024-01547-w

Поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ : Сергей Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; inozemtsevss@mail.ru;

Евгений Валерьевич Королев — доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; korolev@nocnt.ru.

Вклад авторов:

Иноземцев С.С. — концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Королев Е.В. — научное консультирование, экспертная оценка концепции и методологии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shilo O.A. Substantiation of the requirements for performance properties of asphalt concrete of upper layers of bases in terms of fatigue strength. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 1(57):74-83. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.007. EDN YFSAPT. (rus.).

2. Mironov N.S., Chernov S.A. Determination of the effectiveness of the influence of various adhesive additives on the performance characteristics of asphalt concrete properties. *Engineering journal of Don*. 2023; 4(100):532-553. EDN HUKJTC. (rus.).

3. Khafizov E.R., Vdovin E.A., Fomin A.Y., Mavliev L.F., Bulanov P.E. Modern methods of assessment of operating ability of road asphalt concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 1(39):279-285. EDN YIOBBV. (rus.).

4. Kotlyarskij E.V., Kochnev V.I., Davlyatova D.Yu. Block for accounting of characteristics of initial materials in automated design of asphalt concrete mixtures. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013; 6:33-38. EDN RPJPIP. (rus.).

5. Pimenov A.T., Barakhtenova L.A., Pribylov V.S., Murko V.V. Asphaltic concrete at the waste of Kuzbass coal enrichment. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction Institute (State Technical University)*. 2021; 2(65):44-49. EDN VJJWHN. (rus.).

6. Yadykina V., Kuznetsova E., Lebedev M. Change in the properties of asphalt concrete when using hydrophobized mineral powder. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020; 4:17-23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23. EDN AQJHRL. (rus.).

7. Gladkikh V.A., Korolev E.V., Albakosov A.I. Research in viscosity of sulfur-asphalt binders. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 11:72-76. EDN ZTTDQH. (rus.).

8. Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Buyantuev S.L., Dorzhieva E.V. The use of carbon nanomaterials for effective road construction composite. *ESSUTM Bulletin*. 2014; 6(51):67-72. EDN TFLAVX. (rus.).

9. Lesovik V.St., Denisov V.P., Kabalin M.D., Vysotskaya M.A. Justification for the choice of asphalt granuloconcrete mixtures of types M and K from the perspective of the joint work of base layers and pavement surface. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):51-62. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6. EDN HJQTES. (rus.).

10. Nebratenko D.Yu., Zhemerikin A.N., Lyamkin D.I. Investigation of the properties of large-tonnage products of forest chemistry as plasticizers of road bitumen. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(1):73-83. DOI:

10.22227/1997-0935.2025.1.73-83. EDN XQLZMT. (rus.).

11. Rudensky A.V. On the quality control of asphalt concrete in the construction of road surfaces. *World of Roads*. 2020; 133:75-77. EDN BJAEEU. (rus.).

12. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete. *Materials*. 2019; 12(1):168. DOI: 10.3390/ma12010168

13. Al-Mansoori T., Micaelo R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017; 155:1091-1100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137

14. Prasetya M.S., Djakfar L., Wisnumurti W., Sabarudin A. The Effect of Calcium Alginate Capsule on Resilience Modulus of Buton Rock Asphalt-Based Self-Healing Mixtures. *Civil Engineering and Architecture*. 2023; 11(6):3249-3259. DOI: 10.13189/cea.2023.110601

15. Yu X., Liu Q., Wan P., Song J., Wang H., Zhao F. et al. Effect of Ageing on Self-Healing Properties of Asphalt Concrete Containing Calcium Alginate/Attapulgit Composite Capsules. *Materials*. 2022; 15(4):1414. DOI: 10.3390/ma15041414

16. Nosov S.V. Alternative to superpave system in the formation of regional road R&D institute. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 4(60):87-96. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.009 EDN SHLPGN. (rus.).

17. Gotovtsev V.M., Shatunov A.G., Rummyantsev A.N., Sukhov V.D. Principles of forming the optimal structure of asphalt concrete. *Fundamental Research*. 2012; 11-1:124-128. EDN PKWJSP. (rus.).

18. Trautvain A., Akimov A., Denisov V., Lashin M. Features of the method of surrounded design of asphalt-concrete on superpave technology. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 3:8-14. DOI: 10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444. EDN VVZUTB. (rus.).

19. Inozemtsev S.S., Susanina T.V., Stibunov D.V., Keita M.L.F. Trends in the development of scientific directions in the field of road construction materials in Russia. *Construction Materials*. 2023; 12:4-19. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19. EDN DYTSPR. (rus.).

20. Inozemtsev S., Jelagin D., Korolev E., Fasil H., Partl M.N., Trong D.T. Experimental and numerical study

on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent. *Materials and Structures*. 2022; 55(9). DOI: 10.1617/s11527-022-02059-8

21. Belitskii V.D., Katunin A.V. Thesaurus of mathematical models of asphalt and concrete mix compaction process. *Omsk Scientific Bulletin*. 2013; 3(123):18-21. EDN RSSITT. (rus.).

22. Simchuk E.N., Zhdanov K.A., Dedkovskij I.A. Improving approaches and methods for assessing the physical and operational properties of road asphalt concrete in Russia. *Roads and Bridges*. 2021; 1(45):181-221. EDN NLXXIP. (rus.).

23. Rumpf H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft. *Chemie Ingenieur Technik*. 1965; 37(3):187-202. DOI: 10.1002/cite.330370303

24. Rumpf H., Gupte A.R. Einflüsse der Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenstromung. *Chemie Ingenieur Technik*. 1971; 43(6):367-375. DOI: 10.1002/cite.330430610

25. Rumpf H. *Particle Technology*. Springer Netherlands, 1990. DOI: 10.1007/978-94-011-7944-7

26. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Yarovaya O.V. *Microscopic methods for determining the particle sizes of dispersed materials*. Moscow, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2012; 56. EDN YKYHDV. (rus.).

27. Pridatko Y.M., Korolev L.V., Gotovtsev V.M. Modeling of close packed particles arrangement in composite material. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2011; 4(4):(62):96-100. EDN QINUXJ. (rus.).

28. Patent RU No. 2245740 C1. *Method for enrichment of rock mass of heavy metal deposits* / Derkachev B.P.; appl. No. 2003136938/03 24.12.2003; publ. 10.02.2005. (rus.).

29. Leontiev N.E. *Fundamentals of fluid flows through porous media : textbook. 2nd ed.* Moscow, MAX Press, 2017; 88. EDN ZEFAHN. (rus.).

30. Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Smirnov V.A. Nanomodified bitumen composites: solvation shells and rheology. *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2016; 405-410. DOI: 10.1201/b19693-85

31. Jwaida Z., Dulaimi A., Mydin M.A.O., Kadhim Y.N., Al-Busaltan S. The self-healing performance of asphalt binder and mixtures : a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024; 9(7). DOI: 10.1007/s41062-024-01547-w

Received October 2, 2025.

Adopted in revised form on October 7, 2025.

Approved for publication on January 16, 2026.

BIONOTES: **Sergey S. Inozemtcev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; inozemtsevss@mail.ru;

Evgeny V. Korolev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; korolev@nocnt.ru.

Contribution of the authors:

Sergey S. Inozemtcev — research concept, methodology development, writing of the original text, final conclusions.

Evgeny V. Korolev — scientific consulting, expert evaluation of the concept and methodology.

The authors declare no conflict of interest.