

Научная статья  
УДК 625.089.21  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>  
EDN: DNWAJT



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ БЕСПОРИСТЫХ КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Д.В. Фурманов<sup>1</sup>, Л.М. Шамахов<sup>1</sup> ✉, Е.С. Буданова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет,  
г. Ярославль, Россия

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор  
[leonid.shamakhov@yandex.ru](mailto:leonid.shamakhov@yandex.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В работе рассматриваются методы определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, образующихся при фрезеровании асфальтобетонных покрытий дорожными фрезами. Удельная площадь поверхности является ключевым параметром, влияющим на адгезионные свойства, уплотняемость и долговечность вторичных асфальтобетонных смесей.

**Материалы и методы.** В работе представлен способ определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов. Способ основан на трехмерном сканировании с последующим построением облака точек. По полученным полигональным моделям отдельных частиц вычисляется площадь и объем.

**Результаты.** В результате получены значения площади поверхности и объема частиц каменного материала, предварительно разделенного по крупности частиц на фракции путем просеивания материала через сита с изменяемыми размерами сечений. Предложен метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, позволяющий увеличить точность.

**Обсуждение и заключение.** Метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, описанный в данной работе, может быть использован не только в дорожной и строительной отрасли, но и в металлургической, химической, горнодобывающей промышленности. Ключевым результатом работы является то, что метод можно применять для определения, например, битумоемкости или расхода битумной эмульсии при приготовлении асфальтогранулобетона и грунтоцементных смесей в процессе рециклинга. Дополнительно метод позволит произвести оценку затраченной энергии как в процессе фрезерования, так и в процессе измельчения других твердых материалов

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** удельная площадь поверхности, асфальтобетон, беспористые каменные материалы, фрезерование асфальтобетона, дорожная фреза, трехмерное сканирование, экспериментальные исследования, вторичные каменные материалы

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Буданова Е.С. Определение удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, полученных в процессе фрезерования асфальтобетонов // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 554-566. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

© Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Буданова Е.С., 2025



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

EDN: DNWAJT

## DETERMINATION OF THE SPECIFIC SURFACE AREA OF NON-POROUS STONE MATERIALS OBTAINED BY MILLING ASPHALT CONCRETE

Denis V. Furmanov<sup>1</sup>, Leonid M. Shamakhov<sup>1</sup> ✉, Ekaterina S. Budanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University,  
Yaroslavl, Russia

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical  
University (MADI),  
Moscow, Russia

✉ corresponding author  
[leonid.shamakhov@yandex.ru](mailto:leonid.shamakhov@yandex.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper considers methods for determining the specific surface area of porous stone materials formed during milling of asphalt concrete pavements with road cutters. The specific surface area is a key parameter affecting the adhesive properties, compactness and durability of secondary asphalt concrete mixtures.

**Materials and methods.** The paper presents a method for determining the specific surface area of nonporous stone materials. The method is based on three-dimensional scanning followed by the construction of a point cloud. The resulting polygonal models of individual particles are used to calculate the area and volume.

**Results.** As a result, the values of the surface area and volume of particles of stone material have been obtained. The stone material was previously partitioned into fractions according to the particle size by sieving it through sieves with variable cross-section sizes. In addition, a method for determining the specific surface area of non-porous stone materials has been proposed, which allows for increased accuracy.

**Discussion and conclusion.** The method for determining the specific surface area of non-porous stone materials described in this paper can be used not only in the road and construction industries, but also in the metallurgical, chemical, and mining industries. The key result of the work is that the method can be used to determine, for example, the bitumen content or consumption of bitumen emulsion in the preparation of asphalt and cement mixtures during recycling. Additionally, the method provides assessment of the energy expended both during the milling and the grinding of other solid materials.

**KEYWORDS:** Specific surface area, asphalt concrete, porous stone materials, asphalt milling, road milling cutter, three-dimensional scanning, experimental studies, secondary stone materials

**The article was submitted: June 16, 2025; approved after reviewing: July 14, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.**

**All authors have read and approved the final manuscript.**

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

**For citation.** Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Budanova E.S. Determination of the specific surface area of non-porous stone materials obtained by milling asphalt concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(4): 554-566. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

© Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Budanova E.S., 2025



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

## ВВЕДЕНИЕ

Современные дорожно-строительные технологии активно развиваются в направлении рециклинга [1] асфальтобетонных покрытий. Вместе с тем одним из наиболее распространенных способов ликвидации изношенных дорожных покрытий является метод холодного фрезерования, который позволяет удалять поврежденные слои асфальтобетона с последующей переработкой материала. Фрезерованный асфальтобетонный материал представляет собой смесь каменных частиц различной крупности, покрытую остаточным битумом. Его повторное использование в производстве новых асфальтобетонных смесей требует точного контроля физико-механических характеристик, среди которых важное место занимает удельная площадь поверхности.

Определение удельной поверхности асфальтобетонного гранулята после фрезерования позволяет оценить качество переработанного материала для его дальнейшего использования. Удельная поверхность, то есть площадь поверхности частиц, отнесенная к единице массы (объема), напрямую влияет на адгезию битума и его расход при повторном применении гранулята. При рециклинге асфальтобетона знание удельной поверхности помогает оптимизировать состав, правильно подбирая дозировку битума и минеральных добавок. Это особенно важно, поскольку мелкие частицы увеличивают жесткость смеси, а более крупные обеспечивают каркасность и устойчивость к деформациям [2]. Контроль этого параметра позволяет прогнозировать свойства нового покрытия, включая его прочность и долговечность.

Кроме того, определение удельной поверхности помогает оценить качество самого процесса фрезерования. Если обработка слишком интенсивная, образуется много материала мелкодисперсной фракции, что может негативно сказаться на характеристиках асфальтобетонной смеси. В таком случае возрастает потребление энергии, увеличивается износ режущих элементов и уменьшается производительность [3]. Это связано с тем, что дополнительная энергия тратится на образование новых поверхностей в процессе фрезерования. Напротив, рациональный режим фрезерования обеспечивает рациональное соотношение между крупными и мелкими частицами, способствуя экономии материалов и энергии без ущерба для качества.

Для измерения удельной поверхности применяются методы лазерной гранулометрии [4] и расчетные методы на основе просеивания гранулята в ситах [5]. Лазерная гранулометрия позволяет определить размеры частиц с высокой точностью путем дифракционного рассеяния лазерного луча при прохождении через образец. Такой метод дает возможность определить удельную площадь поверхности с учетом формы и шероховатости частиц. Однако метод не лишён недостатков. Определить размеры отдельной частицы, не изменив её положение в пространстве, невозможно. Исходя из чего, по мнению авторов, точность полученных измерений сильно падает. Расчетные методы, опирающиеся на результаты просеивания материала в ситах, предполагают использование эмпирических формул, связывающих гранулометрический состав с удельной поверхностью. Применяются различные модели, учитывающие средний диаметр частиц, их плотность и коэффициент формы. Конечно, такие методы менее точны по сравнению с лазерной гранулометрией, но тем не менее они остаются востребованными благодаря простоте и доступности, особенно при предварительной оценке свойств материала.

Авторами работы [6] представлена эмпирическая модель оценки площади поверхности частиц в горячей асфальтобетонной смеси. Авторы утверждают, что точное определение площади поверхности частиц критически важно для расчета количества битума, необходимого для обеспечения прочности и долговечности асфальтобетонного покрытия. В рамках работы создана математическая модель, основанная на определении гранулометрического состава. В свою очередь модель основана на упрощенных геометрических формах, что не учитывает реальную сложность и неоднородность формы частиц. Также работа имеет эмпирические допущения, связанные с использованием коэффициентов неровности поверхности, что не имеет строгого теоретического обоснования, и коэффициент формы может изменяться в зависимости от материала. Тем не менее полученная модель позволяет упростить и удешевить процесс проектирования горячей асфальтобетонной смеси, объединяя простоту использования с достаточной точностью.

В работе [7] авторы изучают влияние содержания крупного заполнителя и удельной площади поверхности на образование трещин в асфальтобетонных смесях. Исследование основано на виртуальном моделировании ис-

пытаний на изгиб полукруглых образцов методом дискретных элементов с последующей верификацией результатов в рамках лабораторных испытаниях. По полученным результатам, можно говорить о том, что трещины распространяются преимущественно по границам крупных частиц заполнителя. При увеличении содержания крупных частиц развитие трещин замедляется, но при избытке это приводит к снижению прочности из-за недостатка связующего. В то же время авторы работы указывают на то, что удельная площадь поверхности более точно отражает влияние гранулометрического состава на образование трещин, чем просто содержание крупного заполнителя. К сожалению, верификация данных проводилась только при 15 °С. Этого недостаточно, чтобы всесторонне рассмотреть поведение смесей при низких (хрупкое разрушение) и высоких (пластические деформации) температурах. Хотя работа демонстрирует важность определения удельной площади поверхности для прогнозирования прочности при проектировании асфальтобетонных смесей.

Исследование влияния шероховатости поверхности каменных материалов на их абразивный износ отражено в работе [8] авторов Р.Ф. Гайфутдинова и Э.Р. Хафизова. Отдельный интерес представляет метод определения удельной площади поверхности щебня, который применялся для измерения формы зерен до и после испытаний. Для измерения площади поверхности использован метод парафинирования, основанный на определении расхода парафина и толщины его плёнки. На первом этапе навеску щебня покрывали парафином, после чего измеряли массу образцов до и после парафинирования для определения массы парафина. Затем толщина парафиновой плёнки замерялась микрометром. Площадь поверхности парафина вычислялась по формуле (1):

$$S_{\text{нос}} = \frac{m_n}{\rho_n \cdot t}, \quad (1)$$

где  $m_n$  – масса парафина, кг;

$\rho_n$  – плотность парафина, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – толщина пленки парафина, м.

В работе отмечается, что метод парафинирования, несмотря на трудоёмкость и влияние шероховатости, обеспечивает достаточную точность для проведения сравнительного анализа. Однако, по мнению авторов, главным недостатком такого метода является высокая степень зависимости конечных результатов от

вязкости парафина. Этот факт делает результаты трудновоспроизводимыми, что ставит под сомнение заявление о точности представленных результатов. В свою очередь это подтверждается тем, что метод парафинирования является косвенным, так как определяется не площадь поверхности, а масса парафина, налипшего на поверхность каменной фракции.

В работе [9] представлена детальная методика определения параметров пористой структуры углеродных сорбентов, полученных из ископаемых углей. Основное внимание уделено измерению удельной поверхности и общего объема пор. Для расчета удельной поверхности использовались метод Брунауэра-Эммета-Тейлора (ВЕТ) [10]. Метод ВЕТ основан на анализе физической адсорбции газов на поверхности твердых тел, где количество адсорбированного газа зависит от относительного давления пара и пропорционально общей площади поверхности материала. Однако авторы отмечают, что метод ВЕТ не всегда корректен для микропористых структур, но не предлагают альтернативных подходов, что требует дополнительного изучения. Также было бы полезно расширить набор образцов и провести сравнение с другими аналитическими методами. В любом случае данная работа представляет собой ценный методический ресурс, объединяющий применение современного оборудования и многопараметрического анализа.

В исследовании Ш.В. Бузикова и М.В. Мотовиловой [11] рассматривается применение асфальтового гранулята для повышения эксплуатационных характеристик дорожных покрытий. Исходя из методики, предложенной авторами, определение средневзвешенной удельной площади поверхности материала позволит оценить взаимодействие частиц гранулята с вяжущими компонентами асфальтобетонной смеси. Удельная площадь поверхности определяется как сумма произведений удельной поверхности каждой фракции на её массовую долю. К сожалению, в работе не указано, проводились ли прямые измерения площади поверхности фракции или использовались справочные данные для стандартных фракций. Поэтому, несмотря на то что методика и опирается на комбинацию расчетных и экспериментальных подходов, её воспроизведение невозможно без уточнения деталей исследования.

Анализ методов измерения удельной площади поверхности выявил преимущества и ограничения различных подходов. Лазерная

гранулометрия обеспечивает высокую точность, учитывая форму и шероховатость частиц, однако требует сложного оборудования и чувствительна к условиям измерений. Расчётные методы на основе ситового анализа, несмотря на меньшую точность, остаются востребованными благодаря простоте и доступности. Альтернативные методики, такие как парафинирование и метод ВЕТ, также находят применение, но их использование сопряжено с трудоёмкостью и требует дополнительной верификации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При холодном фрезеровании асфальтобетонных покрытий образуется асфальтобетонный гранулят с условно беспористой структурой, частицы которого частично покрыты битумной пленкой. При этом общая площадь открытых пор материала незначительна по сравнению с основной поверхностью частиц. Важно отметить, что наличие таких пор не оказывает существенного влияния на битумоёмкость при использовании гранулята в производстве новых асфальтобетонных смесей. А также на кинетику разрушения при механическом воздействии, например дроблении или холодном фрезеровании рабочими органами дорожных машин.

Для определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов используется технология трехмерного сканирования, обеспечивающая детализированную модель гранул и фиксирующая геометрию частиц, не учитывая возможные внутренние поры, которые не влияют на измеряемую площадь поверхности, а также гранулометрический анализ<sup>1</sup>, который заключается в просеивании материала через сита заданного размера. На первом этапе происходит просеивание каменного материала через набор сит для разделения на фракции (рисунок 1, а) с последующим взвешиванием и определением массовой доли каждой фракции (рисунок 1, б). Из каждой фракции отбирается как минимум

три частицы для дальнейшего трехмерного сканирования (рисунок 1, в) с целью построения облака точек и создания полигональной модели. На основе полигональной модели (рисунок 1, г) определяется площадь поверхности и объем каждой частицы.

Асфальтобетонный гранулят получен в процессе холодного фрезерования верхнего слоя асфальтобетонного покрытия проезжей части одной из автодорог города Ярославля. Покрытие было выполнено из асфальтобетона типа Б<sup>2</sup> марки 2 в 2016 г. Отобранный асфальтобетонный гранулят рассеивался в ситах с круглыми ячейками 20, 15, 10, 5, 3, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм на вибрационной площадке с дальнейшим взвешиванием каждой фракции на лабораторных весах. Далее было отобрано по три образца частиц из трех фракций асфальтобетонного гранулята, а именно из фракций 15,10,5 мм. Данные фракции в процентном соотношении занимают более 40% от общей массы минерального заполнителя. Также в нашем случае выбор трех данных фракций ограничивается возможностями трехмерного сканера. По полученным полигональным моделям происходит определение средней площади поверхности одного из трех образцов частиц, после чего определяется усредненная площадь поверхности для материала заданной фракции.

Вместе с тем для качественного определения площади поверхности и объема отдельной частицы требуется выяснить влияние точности (разрешения) и погрешности сканирования. С этой целью проведен замер частицы из фракции гранулята, оставшегося на поверхности сита с диаметром отверстия 15 мм (таблица 1). Частица сканировалась при изменении разрешения от 0,6 мм/м до 0,05 мм/м. Погрешность измерений определялась по формуле (2):

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

<sup>1</sup> ГОСТ 33029–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 9128–2013. Смесей асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 45 с.

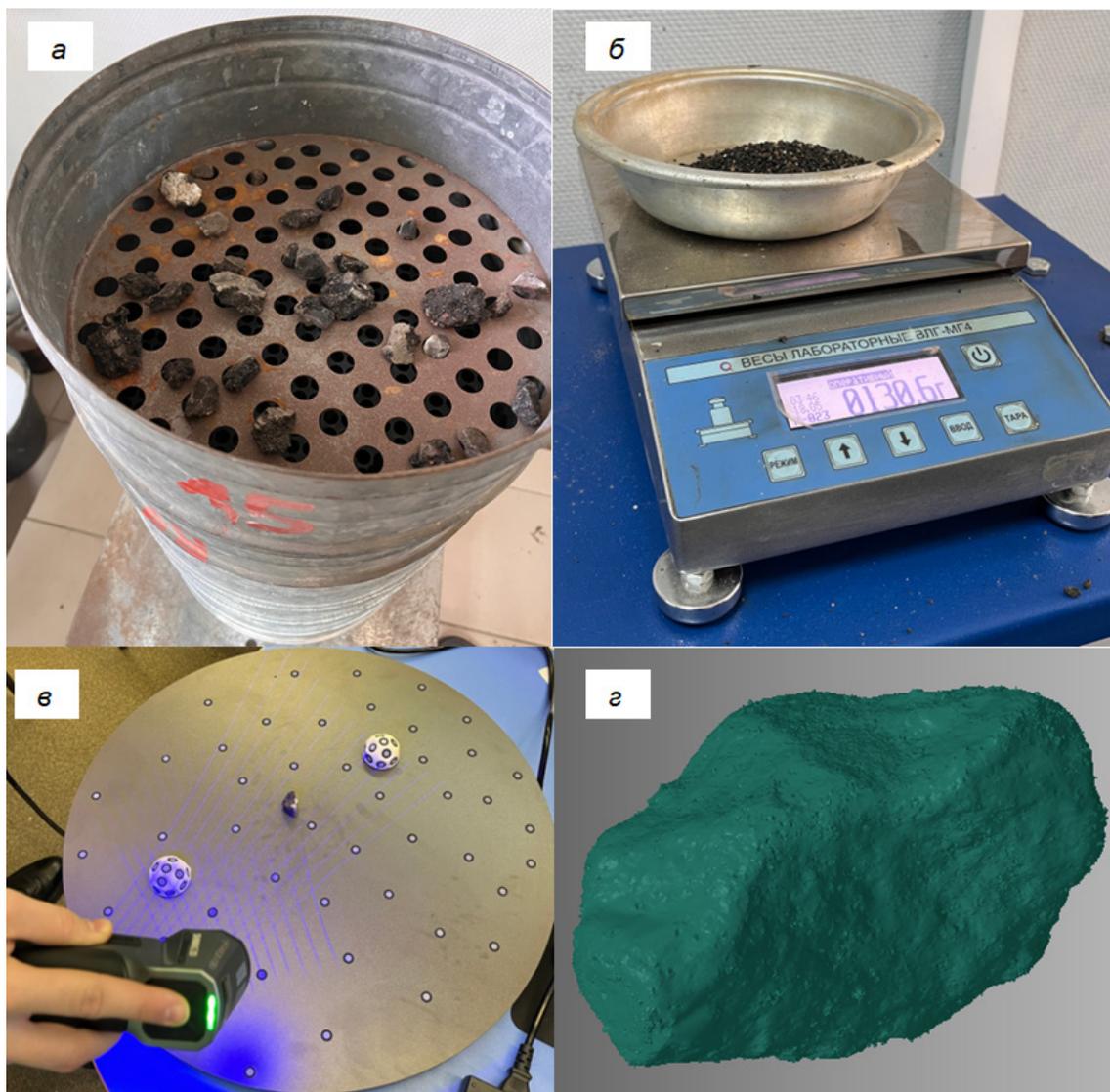


Рисунок 1 – Определение площади поверхности и объема частиц асфальтобетонного гранулята:  
 а – разделение асфальтобетонного гранулята на фракции по крупности частиц;  
 б – определение массовой доли каждой фракции; в – процесс трехмерного сканирования;  
 г – полигональная модель частицы асфальтобетонного гранулята  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Determination of the surface area and the volume of asphalt-concrete granulate particles:  
 а – separation of asphalt-concrete granulate into fractions according to particle size;  
 б – determination of the mass fraction of each fraction;  
 в – three-dimensional scanning;  
 г – polygonal model of an asphalt-concrete granulate particle  
 Source: compiled by the authors.

Таблица 1

Результаты сканирования для выявления влияния точности трехмерного сканера  
Источник: составлено авторами.

Table 1

Scan results to identify the impact of the accuracy of a three-dimensional scanner.

Source: compiled by the authors.

Разрешение трехмерного сканера, мм/м	Площадь, мм <sup>2</sup>	Объем, мм <sup>3</sup>
0,05	2251,0731	5725,3539
0,3	2324,3428	5582,0361
0,6	2229,3115	5718,1537
Погрешность, %	4,08%	2,5%

Полученные результаты демонстрируют высокую точность измерений, а также позволяют сделать вывод, что разрешение сканера минимально влияет на определение удельной площади поверхности. Дальнейшее сканирование асфальтобетонного гранулята требуется проводить при одинаковом разрешении. В рамках настоящей работы результаты сканирования получены при разрешении сканера 0,05 мм/м.

Для определения удельной площади поверхности используется формула (3):

$$S_{y\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot \delta_i}{\rho \cdot V_i}, \quad (3)$$

где  $A_i$  – средняя площадь поверхности, мм<sup>2</sup>;  
 $\delta_i$  – массовая доля каждой фракции;  
 $V_i$  – средний объем частицы, мм<sup>3</sup>;  
 $\rho$  – плотность частицы, Т/м<sup>3</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы получены полигональные модели (рисунок 2) частиц фракций асфальтобетонного гранулята. По моделям удалось установить площадь поверхности и объем частиц трех фракций, значения которых впоследствии были усреднены (таблица 2). Полученные зависимости усредненных значений площади поверхности и объема асфальтового гранулята от приведенных размеров отверстий сит (рисунок 3) позволяют прогнозировать изменение геометрических характеристик.

Таблица 2

Результаты измерения полигональных моделей

Источник: составлено авторами.

Table 2

Measurement results of polygonal models

Source: compiled by the authors.

Измеряемая фракция	Усредненная площадь, мм <sup>2</sup>	Усредненный объем, мм <sup>3</sup>
Навеска сита с диаметром отверстия 5 мм	407,176	376,63
Навеска сита с диаметром отверстия 10 мм	893,42	1442,07
Навеска сита с диаметром отверстия 15 мм	1873,953	4913,49
Уравнения регрессии	$A_i = 43.578 \cdot d^{1.362}$	$V_i = 8.7687 \cdot d^{2.2947}$
Значение достоверности аппроксимации, R <sup>2</sup>	0,9824	0,9847

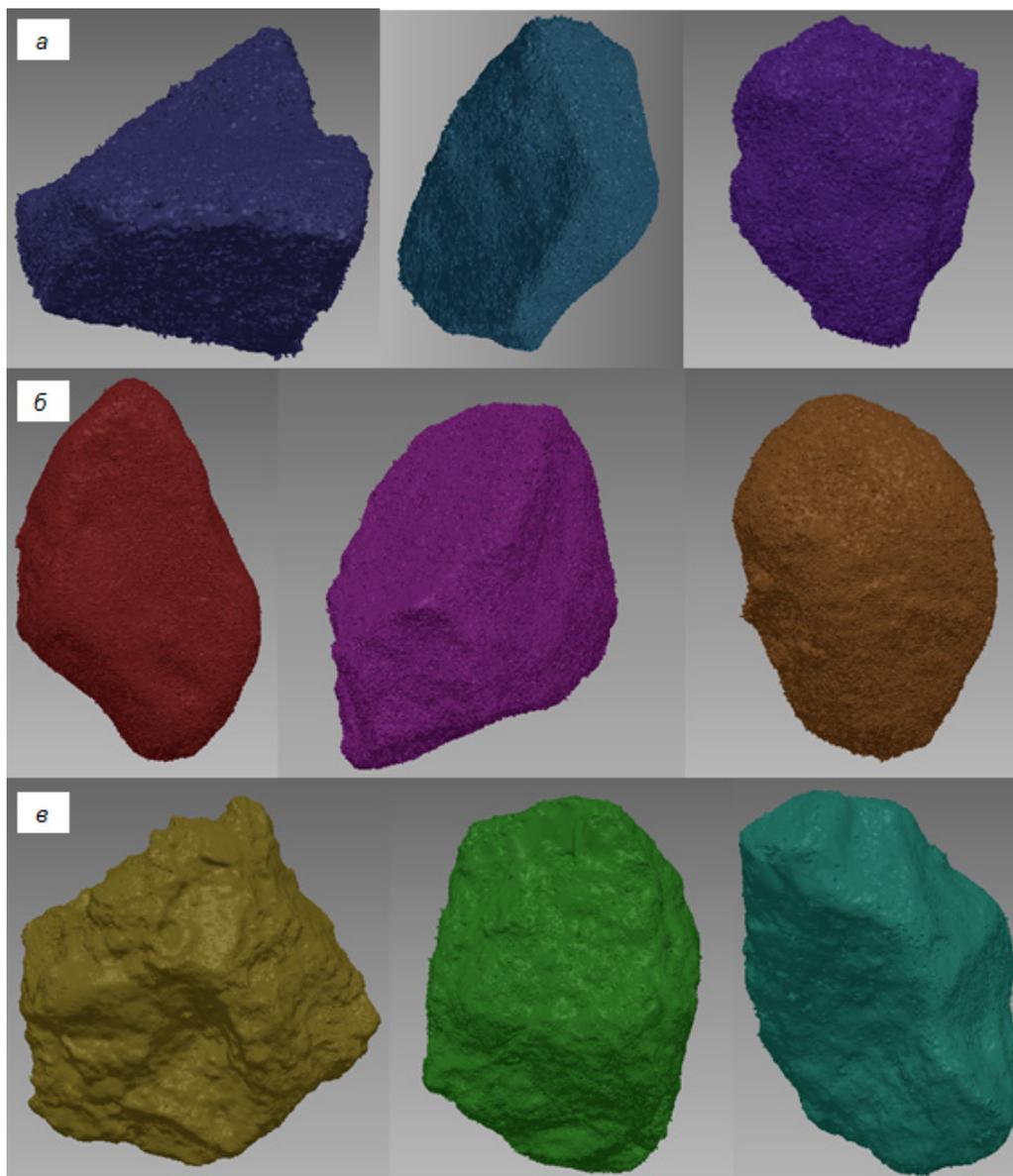


Рисунок 2 – Полигональные модели асфальтобетонного гранулята, разделенного на фракции по крупности частиц: а – навеска сита с диаметром отверстия 5 мм; б – навеска сита с диаметром отверстия 10 мм; в – навеска сита с диаметром отверстия 10 мм  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Polygonal models of asphalt-concrete granulate divided into fractions by particle size: а – a sieve attachment with a hole diameter of 5mm; б – a sieve attachment with a hole diameter of 10mm; в – a sieve attachment with a hole diameter of 10mm  
Source: compiled by the authors.

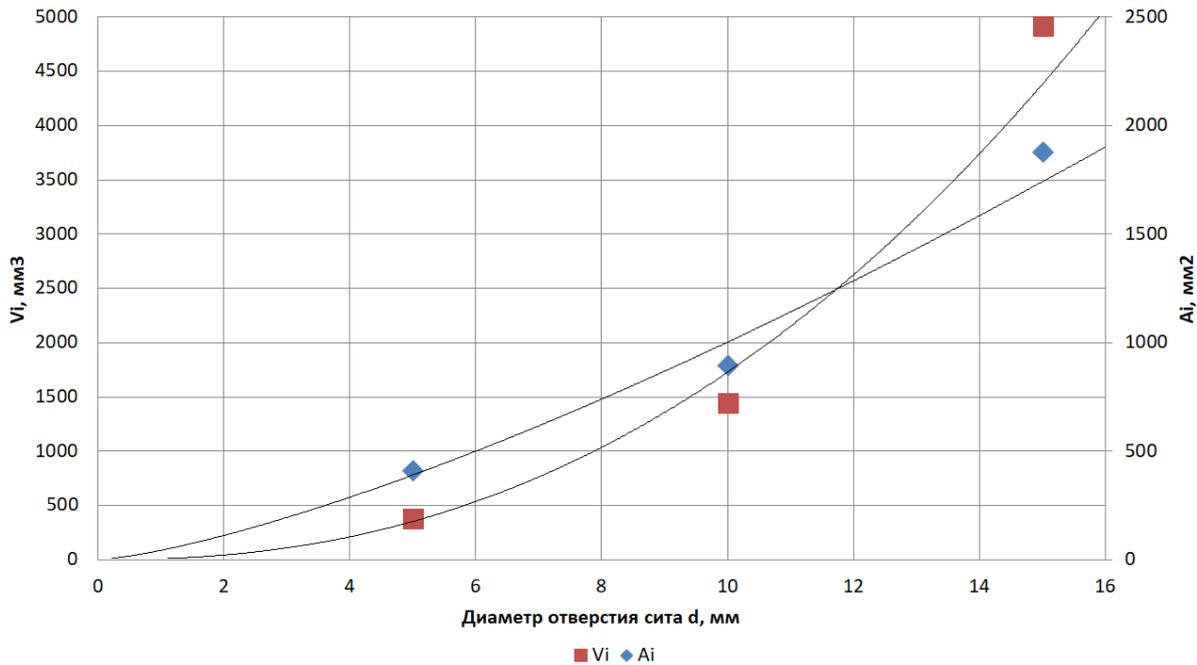


Рисунок 3 – Графики зависимости площади поверхности и объема от диаметра отверстия сита  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of the surface area and the volume on the diameter of the sieve opening  
Source: compiled by the authors.

Зная геометрические размеры асфальтового гранулята, можно определить коэффициенты реальной формы для материала, отсортированного по крупности частиц с помощью сит различного сечения. В свою очередь полученные коэффициенты позволят в дальнейшем определять удельную площадь поверхности, не прибегая к использованию трехмерного сканирования. Коэффициенты позволят с большей точностью определять удельную площадь поверхности в сравнении с методами, опирающимися на расчетные зависимости, где реальную форму частиц принято заменять на геометрические фигуры (шар, куб, тетраэдр и т.д.) [12]<sup>3</sup>.

Таким образом, определим коэффициент реальной формы j-й фракции, воспользовавшись расчетной зависимостью (4) для определения удельной площади поверхности, предложенной в работе [13]:

$$S_{\text{уд}} = \sum_{j=1}^n S_j \cdot \delta_j, \quad (4)$$

где  $S_j$  – удельная поверхность j-й фракции;  
 $\delta_j$  – массовая доля каждой фракции.

Так, в работе [13] удельная поверхность j-й фракции определяться следующим образом:

$$S_j = \frac{K_j}{d_{j, \text{cp}} \cdot \rho_j}, \quad (5)$$

где  $K_j$  – коэффициент формы j-й фракции;  
 $d_{j, \text{cp}}$  – средний размер частиц j-й фракции;  
 $\rho_j$  – плотность материала j-й фракции.

Проанализировав выражение (3) и (4), возможно выразить коэффициент реальной формы для частиц отдельных фракций (6):

$$K_j = \frac{A_j \cdot d_{j, \text{cp}}}{V_j}. \quad (6)$$

<sup>3</sup> Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1986. 149 с.

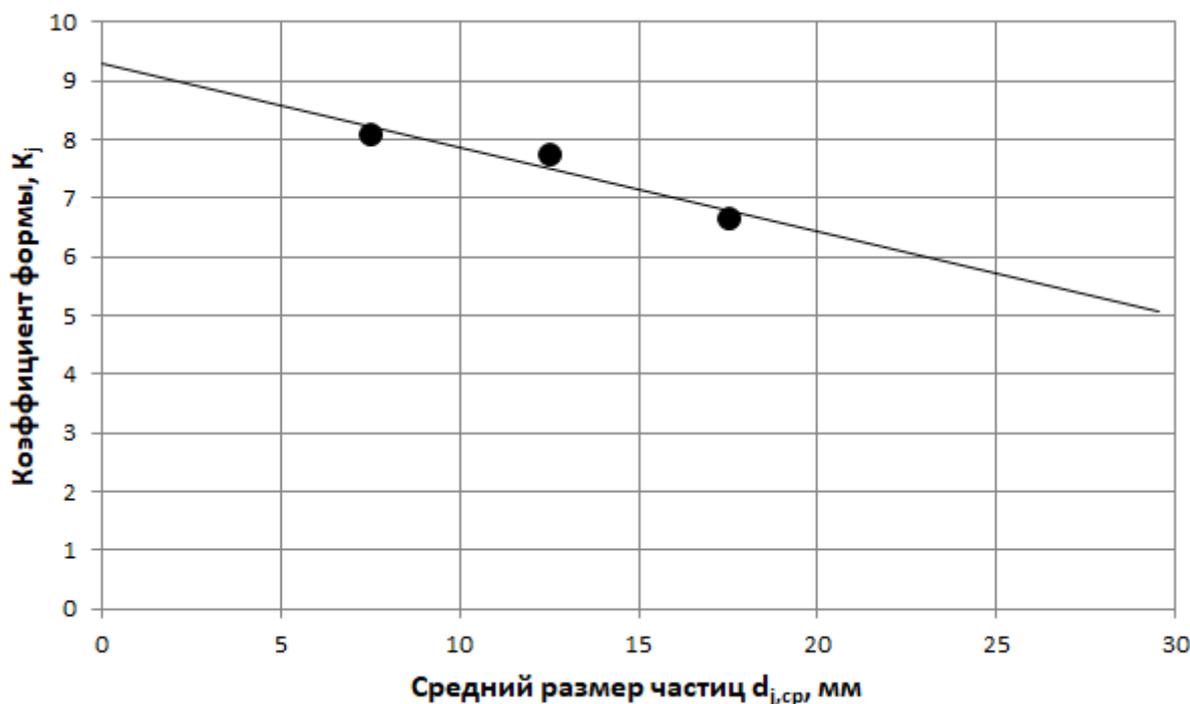


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента реальной формы от среднего размера частиц  
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence between the real shape coefficient and the average particle size.  
 Source: Compiled by the authors.

Средний размер частиц каждой фракции определим исходя из навески сит с разными диаметрами отверстий (7):

$$d_{j,ср} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}, \quad (7)$$

где  $d_{max}$  и  $d_{min}$  – диаметры отверстий верхнего и нижнего сита соответственно.

Таким образом, коэффициенты реальной формы для частиц, разделенных по крупности частиц методом просеивания через сита<sup>4</sup>, отражены в таблице 3.

Для прогнозирования коэффициентов формы получен график зависимостей (рисунок 4) и уравнение регрессии (8). Коэффициент достоверности составил:  $R^2 = 0,9252$ .

$$K_j = -0.1434 \cdot d_{j,ср} + 9.3015. \quad (8)$$

Используя полученные коэффициенты, возможно провести сравнительный анализ (таблица 4) реальных удельных площадей j-й фракции щебня с значениями, полученными в работе [13].

Таблица 3  
 Коэффициенты формы для навесок сит 15, 10 и 5 мм  
 Источник: составлено авторами.

Table 3  
 Coefficients of the shape for sieves of 15, 10 and 5 mm  
 Source: compiled by the authors.

Средний размер частиц, мм	Коэффициент формы
17,5	6,6743
12,5	7,7443
7,5	8,1083

<sup>4</sup> ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.

Таблица 4  
Сравнительный анализ  
Источник: составлено авторами.

Table 4  
Comparative analysis.  
Source: compiled by the authors.

Средний размер фракции, мм	Удельная площадь поверхности j-й фракции				
	Результаты расчётного способа, описанного в работе [13], опирающийся на геометрические фигуры			Коэффициент формы для щебня из гравия K=12, предложенный в работе [13]	Способ, использующий коэффициенты формы отдельной фракции асфальтобетонного гранулята
	Для шара $S_j = \frac{6}{d_{j,сп} \cdot \rho_j}$	Для куба $S_j = \frac{8,5}{d_{j,сп} \cdot \rho_j}$	Для тетраэдра $S_j = \frac{14,7}{d_{j,сп} \cdot \rho_j}$	$S_j = \frac{K}{d_{j,сп} \cdot \rho_j}$	$S_j = \frac{K_j}{d_{j,сп} \cdot \rho_j}$
7,5	0,3	0,43	0,74	0,604	0,408
12,5	0,18	0,26	0,44	0,36	0,234
20 (17.5)	0,113	0,16	0,28	0,22	(0,144)
Плотность материала принята 2,65 Т/м <sup>3</sup>					

Исходя из представленных значений, коэффициент, предложенный в работе [13] для щебня, нельзя использовать по отношению к определению удельной площади поверхности асфальтобетонного гранулята. Однако результаты, полученные в ходе анализа, позволяют сделать вывод о том, что для определения удельной площади поверхности асфальтобетонного гранулята возможно применение расчетного способа, опирающегося на коэффициент формы куба для щебня. Так, при сравнении значений удельных площадей, полученных при использовании коэффициентов формы частиц щебня и коэффициента формы куба, можно обратить внимание, что они находятся в пределах погрешности.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило разработать метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, полученных в процессе фрезерования асфальтобетонных покрытий с использованием трёхмерного сканирования. Впервые был применен метод трёхмерного сканирования, который позволяет с высокой точностью определять геометрические характеристики частиц (площадь поверхности и объем) и на их основе рассчитывать удельную площадь поверхности, что является ключевым параметром при подборе дозировки битума и минеральных добавок. Такой подход отличается от традиционных методов тем, что учитывает реальную

форму поверхности, что существенно повышает точность измерений.

Ключевым достижением работы является то, что впервые были получены данные для гранул асфальтобетона, учитывающие их реальную удельную площадь поверхности. Это позволяет более точно рассчитывать удельную площадь поверхности в сравнении с другими существующими методами. Вместе с тем полученные коэффициенты возможно использовать без проведения трудоемкого и дорогостоящего трехмерного сканирования в дальнейшем.

Экспериментальные данные показали, что погрешность определения площади поверхности и объема частиц при разных разрешениях трехмерного сканера не превышает 5%. По мнению авторов, разрешение трехмерного сканера влияет в меньшей степени на полученные результаты, поэтому предложенный метод применим для задач проектирования асфальтобетонных смесей, требующих высокой точности.

Разработанный метод может быть использован не только в дорожном строительстве для оптимизации состава асфальтобетонных смесей, но и в других отраслях, таких как металлургия, химическая промышленность и горнодобывающая деятельность, где требуется точное определение удельной площади поверхности материалов. Полученные результаты возможно применить для оценки энергетических затрат в процессах фрезерования и дробления [14], так как на величину удельной энергии образования

новой поверхности решающее влияние оказывает размер частиц разрушаемого материала [15]. Чем мельче частицы, тем больше энергии требуется для их дальнейшего измельчения, что, в свою очередь, связано с увеличением удельной площади поверхности при уменьшении размера частиц. Поэтому, определив удельную площадь поверхности отфрезерованного асфальтового гранулята, возможно оценить энергетические затраты процесса фрезерования и эффективность конструкции рабочего органа дорожной фрезы в целом.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабалин М.Д., Токарев В.А., Лю Ч., Юдина М.С. Рециклинг при строительстве дорог транспортно-дорожного комплекса региона. Обзор // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-1(87). С. 12–19. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-12-19](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-12-19). EDN GMXTUP.

2. Пугин К.Г., Тюрюханов К.Ю. Влияние удельной поверхности минеральных частиц на физико-механические показатели асфальтобетонов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020. № 2. С. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.02.04>. EDN FYDXQB.

3. Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Лысков Н.Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2(90). С. 204–216. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN KLHYLT.

4. Anochie-Boateng J. K., Komba J., Tutumluer E. Aggregate surface areas quantified through laser measurements for South African asphalt mixtures // Journal of Transportation Engineering. 2012. Т. 138. № 8. pp. 1006–1015.

5. Lu D., Liu H., Guan C. Study on ascertaining specific surface area of asphalt mixture aggregate // GongluJiaotongKeji/ Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2011. Т. 28. no. 5.

6. Panda R.P., Das S.S., Sahoo P.K. An empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2016. Т. 3. no. 2. pp. 127–136.

7. Liang H., Shi L., Wang D. [et al.] Influence of graded coarse aggregate content and specific surface area on the fracture properties of asphalt mixtures based on discrete element simulations and indoor tests // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 299. P. 123942. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123942. EDN AUJNFK.

8. Гайфутдинов Р.Ф., Хафизов Э.Р. Исследование абразивного износа щебня для автомобильных дорог // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 1(51). С. 128–137. EDN SEFEOI.

9. Козлов А.П., Дудникова Ю.Н., Зыков И.Ю., Созинов С.А., Исмагилов З.Р. Методические аспекты определения параметров пористой структуры углеродных сорбентов на основе ископаемых углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6 (124). С. 197–203.

DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-6-198-204>

10. Fagerlund G. Determination of specific surface by the BET method // Materials and Structures. 1973. Vol. 6, No. 3. P. 239–245. DOI 10.1007/bf02479039. EDN VGPWER.

11. Бузиков Ш.В., Мотовилова М.В. Повышение эксплуатационных показателей дорожных покрытий с асфальтовым гранулятом // Строительство и реконструкция. 2023. № 2(106). С. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-101-111>. EDN VECTRK.

12. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79>. EDN VIEZDF.

13. Романюк В.Н. Эксергия асфальтобетонной смеси // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 69–76. EDN GDOLBM. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76>

14. Фурманов Д.В., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-мастичного асфальтобетонного гранулята // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6(100). С. 852–866. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>. EDN XPF BRO.

15. Голик В.И., Кожиев Х.Х., Голодов М.А., Армейсков В.Н. Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. № 2(62). С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-81-87>. EDN VZGVFP.

## REFERENCES

1. Kabalin M. D., Tokarev V. A., Liu Chunguang, Iudina M. S. Recycling in the construction of roads of the transport and road complex of the region. Review. *World of transport and technological machines*. 2024; 4-1(87): 12–19. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-12-19](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-12-19). (in Russ.) EDN GMXTUP.

2. Pugin, K. G., Tyuryukhanov K. Yu. The effect of the specific surface of mineral particles on the physical and mechanical properties of asphalt concrete. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2020; 2: 39–46. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.02.04>. EDN FYDXQB.

3. Furmanov D. V., Shamakhov L. M., Lysakov N. E. Wear out effect for cutting element of milling machine on asphalt concrete cutting strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 204–216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN: KLHYLT

4. Anochie-Boateng J. K., Komba J., Tutumluer E. Aggregate surface areas quantified through laser measurements for South African asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. 2012; Т. 138. no 8: 1006–1015.

5. Lu D., Liu H., Guan C. Study on ascertaining specific surface area of asphalt mixture aggregate. *GongluJiaotongKeji. Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2011; Т. 28. no 5.

6. Panda R.P., Das S.S., Sahoo P.K. An empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016; T. 3. no 2: 127–136.

7. Liang H., Shi L., Wang D. [et al.] Influence of graded coarse aggregate content and specific surface area on the fracture properties of asphalt mixtures based on discrete element simulations and indoor tests. *Construction and Building Materials*. 2021; Vol. 299: 123942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123942>. EDN AUJNFK.

8. Gaifutdinov R.F., Khafizov E.R. Research of abrasive wear of crushed stone for highways. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2020; 1(51): 128–137. (in Russ.) EDN SEFEOI.

9. Kozlov A.P., Dudnikova Yu.N., Zykov I.Yu., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Methodical aspects of determining the porous structure parameters of carbon sorbents based on fossil coals. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 6 (124): 197–203. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-6-198-204>

10. Fagerlund, G. Determination of specific surface by the BET method. *Materials and Structures*. 1973; 6, No. 3: 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02479039>. EDN VGPWEP.

11. Buzikov Sh.V., Motovilova M.V. Improving the performance of road surfaces with asphalt granulate. *Building and Reconstruction*. 2023; (2): 101–111. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-101-111>

12. Simonov P. S. Single-impact rock crushing experiment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (1): 71–79. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79>.

13. Romaniuk V.N. Exergy of Asphalt Concrete Mix. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2003; (4): 69–76. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76>

14. Furmanov D.V., Budanova E.S. Efficiency evaluation of the milling process based on the granulometric analysis of crushed stone-mastic asphalt concrete granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 852–866. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>. EDN: XPFBRO

15. Golik V.I., Kojiev H.H., Golodov M.A., Armeiskov V.N. Research of the properties of rocks during fragmenting and crushing in mechanical mills. *News of the Ural State Mining University*. 2021; 2(62): 81–87. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-81-87>. EDN VZGVFP.

## ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

*Фурманов Д.В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, корректирование материала статьи.*

*Шамахов Л.М. Обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.*

*Буданова Е.С. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, подготовка отдельных материалов для статьи.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*D.V. Furmanov. Management of the work of the co-authors, identifying the research problem, designing the tasks and research methods, correcting the manuscript.*

*L.M. Shamakhov. Review of previous studies, preparing and conducting experimental studies, processing the data obtained, writing the manuscript.*

*E.S. Budanova. Preparing and conducting experimental studies, processing the obtained results, writing some sections of the manuscript.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6932-6477>,

**SPIN-код:** 6237-2284,

**e-mail:** [denis\\_furmanov@mail.ru](mailto:denis_furmanov@mail.ru)

*Шамахов Леонид Михайлович – аспирант, ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>,

**SPIN-код:** 9115-7950,

**e-mail:** [leonid.shamakhov@yandex.ru](mailto:leonid.shamakhov@yandex.ru)

*Буданова Екатерина Сергеевна – аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-7962-0203>,

**SPIN-code:** 7600-9464.

**e-mail:** [Cat156026@yandex.ru](mailto:Cat156026@yandex.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Denis V. Furmanov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery Yaroslavl State Technical University (Moskovsky Prospect., 88, Yaroslavl, 150023).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6932-6477>,

**SPIN-code:** 6237-2284,

**e-mail:** [denis\\_furmanov@mail.ru](mailto:denis_furmanov@mail.ru)

*Leonid M. Shamakhov – Postgraduate student, assistant of the Department of “Construction and Road Machinery” of Yaroslavl State Technical University (Moskovsky Prospect., 88, Yaroslavl, 150023).*

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>,

**SPIN-код:** 9115-7950,

**e-mail:** [leonid.shamakhov@yandex.ru](mailto:leonid.shamakhov@yandex.ru)

*Ekaterina S. Budanova – Postgraduate student at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Leningradsky Prospect. 64, Moscow, 125319)*

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-7962-0203>,

**SPIN-code:** 7600-9464,

**e-mail:** [Cat156026@yandex.ru](mailto:Cat156026@yandex.ru)