

Научная статья
УДК 625.089.21
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>
EDN: RVMESZ



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО МАТЕРИАЛА

Д.В. Фурманов¹, Л.М. Шамахов¹ ✉, Е.С. Буданова²

¹Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

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

✉ ответственный автор
leonid.shamakhov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Энергия при фрезеровании асфальтобетонных покрытий затрачивается на разрушение каменной фракции, битумных связей, а также прочих факторов, которые в совокупности не влияют на появление новых поверхностей. Целью данной работы является поиск и предварительная оценка метода косвенного определения эффективности работы фрезерных рабочих органов на основе анализа энергозатрат.

Материалы и методы. В работе используются два набора асфальтобетонного гранулята марки Б типа 2, полученные при холодном фрезеровании покрытий. Для сравнения применялись идентичные фрезерные барабаны с разной схемой расстановки режущих элементов. Применение технологии 3D-сканирования позволило получить полигональные модели частиц и количественно оценить изменение площади поверхности материала в процессе фрезерования. Для фракций, не подвергавшихся сканированию, параметры поверхности определялись через уравнения регрессии, построенные на основе экспериментальных данных. Основой исследования послужил энергетический подход, связывающий затраты энергии с образованием новых поверхностей при разрушении асфальтобетонного композита.

Результаты. Основная часть энергии (до 99%) при фрезеровании расходуется на разрушение битумных связей, а не каменной фракции. Сравнение двух фрезерных барабанов показало, что одна из двух конструкций на 19,25% энергоэффективнее за счет расположения режущих элементов. Разработанная методика 3D-сканирования и гранулометрического анализа подтвердила универсальность оценки процессов измельчения, а также выявила ключевые факторы энергопотребления: толщину стружки (прямая зависимость), температуру материала (обратная) и конструкцию оборудования. Вместе с тем уточнены зависимости для оценки удельных поверхностей каменных фракций и получены зависимости для определения удельных поверхностей асфальтобетонного гранулята.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют производить оценку затрачиваемой энергии при удалении изношенных слоев асфальтобетонных покрытий. Вместе с тем разработанный метод демонстрирует точность и эффективность по сравнению с расчетными методами. Это позволяет рекомендовать метод не только для оценки энергозатрат в процессе фрезерования асфальтобетонов, но и в процессе измельчения других твердых материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожная фреза, асфальтобетон, процесс фрезерования, энергоэффективность, гранулометрический анализ, 3D-сканирование, экспериментальные исследования

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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. Оценка эффективности дорожных фрез на основе гранулометрического анализа измельченного материала // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 710-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

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



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

EDN RVMESZ

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ROAD MILLING TOOLS BASED ON GRANULOMETRIC ANALYSIS OF THE GROUND MATERIAL

Denis V. Furmanov¹, Leonid M. Shamakhov¹ ✉, Ekaterina S. Budanova²

¹Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
leonid.shamakhov@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Milling asphalt concrete pavements, energy is spent on the destruction of the stone fraction, bituminous bonds, as well as other factors that, taken together, do not affect the emergence of new surfaces. The objective of the research is to develop and conduct a preliminary evaluation of a method for indirect determination of the efficiency of milling tools based on energy consumption analysis.

Materials and methods. Two sets of asphalt concrete granulate of type B grade 2, obtained by cold milling of coatings are used in this study. Identical milling drums with different schemes of arrangement of cutting elements were used for comparison. The use of 3D scanning technology allowed to obtain polygonal models of particles and to quantify the change in the surface area of the material during milling. For fractions not subjected to scanning, the surface parameters were determined through regression equations based on experimental data. The study was based on an energy approach that links energy consumption with the formation of new surfaces during the destruction of an asphalt concrete composite.

Results. The main part of the energy (up to 99%) during milling is spent on breaking the bitumen bonds, rather than the stone fraction. A comparison of two milling drums showed that one of the two designs is 19.25% more energy efficient due to the arrangement of the cutting elements. The developed 3D scanning and granulometric analysis methodology confirmed the versatility of assessing milling processes and also identified the key factors of energy consumption: the thickness of the shavings (direct relationship), material temperature (inverse relationship), and equipment design. At the same time, the dependences for estimating the specific surfaces of stone fractions were refined, and the dependences for determining the specific surfaces of asphalt concrete granulate were obtained.

Discussion and conclusions. The obtained results make it possible to conduct the estimation of the energy consumed when removing worn layers of asphalt concrete pavements. At the same time, the developed method demonstrates accuracy and efficiency in comparison with calculation methods. This allows us to recommend this method not only for evaluation energy consumption in the process of asphalt concrete milling, but also for the milling process of other solid materials.

KEYWORDS: road milling cutter, asphalt concrete, milling process, energy efficiency, granulometric analysis, 3D scanning, experimental studies

The article was submitted: August 14, 2025; approved after reviewing: September 17, 2025; accepted for publication: October 21, 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. Evaluation of the effectiveness of road milling tools based on granulometric analysis of the ground material. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 710-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

© Furmanov Denis V., Shamakhov Leonid M., Budanova Ekaterina S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Современный дорожный комплекс является ключевым элементом транспортной инфраструктуры и в первую очередь обеспечивает безопасность и эффективность грузовых и пассажирских перевозок. Тем не менее дорожные асфальтобетонные покрытия постепенно теряют свои функциональные характеристики под действием интенсивной эксплуатации, климатических факторов и естественного старения [1]. Этот факт требует проведения регулярных ремонтов и реконструкций дорожного полотна.

Одним из наиболее распространённых методов удаления изношенного асфальтобетонного покрытия является технология холодного фрезерования дорожно-фрезерными машинами. Данная технология не только обеспечивает качественную подготовку поверхности для укладки нового асфальтобетонного покрытия, но и позволяет повторно использовать полученный материал для строительства и реконструкции асфальтобетонных дорожных покрытий [2].

Фрезерные машины, в качестве рабочего органа оснащенные вращающимся барабаном с режущими элементами, преобразуют механическую энергию в образование новых поверхностей разрушаемого материала. Энергоемкость этого процесса зависит от конструктивных параметров оборудования и характеристик измельчаемого материала. К конструктивным параметрам относится скорость вращения барабана, геометрия и износ режущего элемента, мощность энергетической установки. Так, при повышенном износе режущих элементов фрезерного барабана, энергоемкость процесса фрезерования возрастает в 2-3 раза по сравнению с новыми режущими элементами [3, 4]. Также совершенно естественно, что энергоемкость фрезерования асфальтобетона зависит от свойств обрабатываемого материала. Таким образом, проблема усугубляется тем, что непрерывно совершенствуются асфальтобетонные покрытия. Например, энергия, затрачиваемая на удаление новых типов асфальтобетонных

покрытий¹, возрастает практически в 1,5–2 раза [5] по сравнению с асфальтобетонами, изготовленными по устаревшим стандартам². В свою очередь, температура асфальтобетона значительно влияет на энергетические показатели процесса фрезерования. Так, нагрузки, действующие на режущие элементы при высокой температуре асфальтобетона, значительно ниже. Следовательно, энергоемкость процесса фрезерования в целом уменьшается при возрастании температуры асфальтобетона [6]. Вместе с тем при увеличении глубины фрезерования нагрузки, действующие на режущий элемент, будут возрастать нелинейно [7]. Задача уменьшения энергопотребления процесса фрезерования приобретает критическое значение, так как это напрямую влияет: на стоимость проведения работ по ремонту и реконструкции дорожной инфраструктуры; на выбор и обоснование мощности энергетической установки, служащей для привода рабочего органа; а также на экологическую обстановку в целом³.

Определение фактических затрат энергии является достаточно сложным процессом. Существующие подходы для оценки затрачиваемой энергии варьируются от прямых измерений мощности и крутящего момента [8] рабочего органа дорожно-фрезерной машины до математического моделирования и методов машинного обучения [9]. Такие методы обладают уникальными преимуществами и ограничениями, обусловленные точностью, сложностью реализации и адаптивностью к условиям работы.

Таким образом, целью данной работы является поиск и предварительная оценка метода косвенного определения эффективности работы фрезерных рабочих органов на основе энергетического подхода. Актуальность работы заключается в отсутствии необходимой информации о влиянии расположения режущих элементов по поверхности фрезерного барабана на затраты энергии в процессе фрезерования асфальтобетонных покрытий.

Холодное фрезерование, по сути, представляет собой процесс механического измельчения материала с образованием новых

¹ ГОСТ Р 58406.1–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020.

² ГОСТ 31015–2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

³ Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 254 с.: ил.

поверхностей. Это позволяет изучать этот процесс, используя общую методическую базу, используемую при дроблении горных пород, руды или других каменных материалов. Энергетические подходы, которые вошли в основу этих методов, могут позволить решить данную задачу. Например, классические теории разрушения Риттингера⁴, Кирпичёва–Кика⁵ и Бонда⁶ действительно связывают энергию, необходимую для разрушения материала, с образованием новой удельной поверхности. Теория Риттингера заключается в том, что энергия, затрачиваемая на разрушение материала, пропорциональна приросту новой поверхности. То есть работа разрушения зависит от площади вновь образованных поверхностей. Теория Кирпичёва – Кика основана на зависимости энергии разрушения от объёмной деформации материала и пропорциональна уменьшению его линейных размеров (объёма). Согласно этой теории, энергия тратится на деформацию материала до его разрушения, а не только на создание новой поверхности. В свою очередь, основная идея теории Бонда заключается в объединении теории Риттингера и Кирпичёва – Кика, предложив полуэмпирическую модель. Таким образом, энергия разрушения является промежуточной между теориями Риттингера и Кирпичёва – Кика и зависит от квадратного корня из отношения начального и конечного размеров частиц. Эти теории используются в расчётах энергозатрат при дроблении и измельчении в горном деле, металлургии, производстве строительных материалов и химической промышленности. Однако более современные исследования частично подтверждают и в то же время опровергают данные гипотезы.

Так, работа [10] посвящена исследованию центробежно-ударного способа дробления доломитового щебня, уделяя внимание энергоэффективности процесса дробления. Авторы приводят зависимости и экспериментальные данные, которые позволяют рассмотреть влияние различных параметров на процесс дробления. Также авторы работы указывают на то, что определение энергоёмкости процесса дробления затруднено из-за отсутствия аналитических методов, позволяющих опре-

делить количество и размер фракций, на которые разделяется исходный кусок материала под действием сил. Вместе с тем авторы работы считают, что расчет энергозатрат процесса разрушения затруднен значительным влиянием дефектов структуры материала и хаотическим распределением материала между собой.

Работа Р.П. Заднепровского [11] посвящена анализу энергоёмкости процессов измельчения материалов различной структуры (твёрдых, жидких, вязкопластичных). В работе рассматриваются механические способы измельчения, и отмечается, что из-за разнообразия возможных структур (зернистые, слоистые, волокнистые) материалов универсального способа дробления не существует. Вместе с тем автором предложена энергетическая модель измельчения материала, которая представлена в виде выражения

$$N = N_p + N_c + N_T + N_X + N_B, \quad (1)$$

где N_p, N_c, N_T, N_X, N_B – соответственно, затраты энергии (удельные мощности) на разрушение междучастичных связей до конечной стадии измельчения, сообщение кинетической энергии продуктам измельчения, трение, динамические потери в рабочем органе, процессы реагрегации.

Под реагрегацией понимается самопроизвольный процесс укрепления ультрамелких частиц, появляющихся при измельчении. Таким образом, автором предполагается, что непременно присутствуют мельчайшие фракции и их агрегаты с внутренним сцеплением (когезией), более значительным, чем междучастичные связи. Автор представляет характеристику прочности как энергию междучастичных связей в виде произведения удельной работы, затраченной на образование единицы поверхности (Нм/м^2) и площади удельной поверхности. Однако определение реальных значений удельной работы достаточно затруднено. Поэтому предложена более практическая зависимость для определения удельных затрат энергии на измельчение материалов, склонных к хрупкому разрушению в следующем виде:

⁴ Peter von Rittinger. Lehrbuch der Aufbereitungskunde: in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbildung systematisch dargestellt. Berlin, Ernst & Korn, 1867. 595p.

⁵ Kick F. Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen: Nebst Versuchen über das Verhalten verschiedener Materialien bei gleichen Formänderungen sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk. Felix, 1885.

⁶ Bond F. C. Crushing and grinding calculations. Allis-Chalmers: Allis-Chalmers press. 1961, p. 16.

$$N = \Pi k \sigma^2 d_1 / d_2 \gamma E, \quad (2)$$

где Π – измельчение единицы массы исходного сырья, кг/с; k – коэффициент, учитывающий соотношение пластичных и упругих разрушающих деформаций, σ – характеристика прочности, дж/кг; d_1, d_2 – среднеинтегральные максимальный и минимальный размер частиц; γ – плотность породы, кг/м³; E – модуль упругости.

К сожалению, автор работы не приводит подробных экспериментальных результатов, которые подтверждают теоретические расчеты. Например, в работе не хватает конкретных измерений энергозатрат для разных типов материалов и методов измельчения. Однако работа все равно представляет значительный научный интерес, а результаты исследования применимы для реальных производственных процессов.

Исследование, описанное в работе [12], посвящено изучению взаимосвязи между удельной энергией удара и гранулометрическим составом продуктов дробления горной породы. По мнению автора, из-за сложности процесса разрушения горной породы возникают определенные трудности определения оптимальных значений энергетических затрат при требуемом качестве дробления. Из-за чего приходится каждый раз для конкретной горной породы и условий разрушения устанавливать зависимость гранулометрического состава кусков от расхода энергии. Также автором были проведены лабораторные исследования дробимости горных пород единичным ударом на вертикальном копре, исходя из полученных результатов, определялась удельная энергия удара. Для построения зависимостей были определены средние размеры фракций и степени дробления для обоснования качества измельчения материала. Это позволило установить нелинейную зависимость максимального размера каменного материала от удельной энергии удара, так как рост степени дробления замедляется с увеличением энергии удара. Автор отмечает, что результаты противоречат линейному закону П. Риттингера, который считал, что энергия дробления от начального размера до конечного пропорциональна вновь образованной поверхности. Это связано с диссипацией энергии (тепловые потери, разлет фрагментов, образование микродефектов) с ростом скорости нагружения. Однако исследо-

вание ограничено одним типом породы (доломит), поэтому отдельный интерес представляет проверка метода на других материалах.

Автор работы [13] провел исследование эксергии асфальтобетонной смеси для анализа ресурсосберегающего потенциала её производства. Автор рассматривает три составляющие эксергии: термомеханическую, реакционную и концентрационную. Наибольшее внимание автор уделяет концентрационной составляющей, которая, в свою очередь, зависит от адгезивного взаимодействия битума с минеральными материалами и их удельной поверхностью. Приведены экспериментальные данные по работе адгезии для различных битумов и минералов, а также методы расчета удельной поверхности фракций с применением эксергетического метода термодинамического анализа⁷. Тем не менее работа требует актуализации данных и дополнительных экспериментальных исследований для повышения точности. Результаты исследования с точки зрения методики несут особую ценность для термодинамического анализа производства асфальтобетонной смеси.

Работа Л.С. Читалова и В.В. Львова [14] посвящена сравнительной оценке методов определения рабочего индекса шарового измельчения Φ . Бонда (BW_i), одного из ключевых параметров для прогнозирования энергозатрат в процессе подготовки руды. Стандартный метод Φ . Бонда позволяет напрямую оценить удельное энергопотребление. Процесс определения индекса представляет собой периодичное измельчение в стандартизованных параметрах шаровой мельницы (фиксированная скорость вращения барабана, шаровой загрузке и крупности фракции). Для определения индекса BW_i (кВтч/т) используется выражение

$$BW_i = \frac{1.1023 \cdot 44.5}{A^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82} \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \quad (3)$$

где A – размер ячейки контрольного сита, мкм; G_{bp} – параметр измельчаемости в последних трех циклах теста, г/об; F_{80} – теоретический размер ячейки сита, через которое проходит 80% массы исходной пробы, мкм; P_{80} – теоретический размер ячейки сита, через которое проходит 80% массы конечного продукта, мкм.

⁷ Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

Тем не менее основным недостатком определения индекса является то, что требуется до 12 ч тестирования и 10 кг материала, из-за чего данный метод практически невозможно использовать в исследованиях с большим количеством повторяющихся опытов. Исследователи провели комплексный анализ методов определения BW_i с точки зрения точности, ресурсозатрат и применимости. В целом работа предлагает различные подходы для определения BW_i , выбор которых зависит от исходных данных и количества повторяющихся опытов.

Авторы работы [15] демонстрируют прикладную модель измельчения твердых частиц при ударе о жесткую поверхность. Работа направлена на преодоление ограничений в классических теориях измельчения путем учета динамических параметров процесса, таких как скорость удара, время контакта и физико-механические свойства материала. Таким образом, авторами предложена уточненная механико-математическая модель, основанная на теории распространения упругих волн. Вместе с тем авторы отмечают, что традиционные теории оценки энергии измельчения содержат коэффициенты пропорциональности, определение которых затруднено. Исходя из анализа работы, сложно сказать, учитывает ли полученная модель влияние формы частицы, так как в работе рассматривается только стержень. Уточненная модель, учитывающая волновые процессы и динамические параметры, позволяет более точно оценивать энергию разрушения и прогнозировать результаты измельчения. Но для широкого внедрения необходима экспериментальная валидация на разнообразных материалах.

Работа [16] описывает проблему низкой энергоэффективности процессов измельчения минералов. Автор определяет теоретический предел энергоэффективности измельчения при сжатии и сравнивает его с фактической эффективностью, рассчитанной через индекс Бонда. Для определения теоретического предела эффективности используется модель хрупкого разрушения частицы с центральной трещиной при сжатии. На основе уравнений механики разрушения и упругих свойств материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) рассчитывается максимальная доля энергии, преобразуемой в создание новой поверхности трещин. Далее рассчитывается фактическая эффективность через соотношение энергии, затраченной на создание новой поверхности и работы, определённой по индексу Бонда. Относительная эффективность введена как

практический показатель, отражающий близость процесса к теоретическому пределу, и позволяет оценить потенциал конкретных работ. Исследование демонстрирует, что современные процессы измельчения сильно отличаются от теоретического предела эффективности.

Исследование свойств горных пород при измельчении в механических мельницах представлено в работе [17]. Авторы работы рассматривают процесс дробления и измельчения с точки зрения снижения энергоёмкости при сохранении эффективности. В статье представлены экспериментальные данные величин удельной энергии образования новых поверхностей (Дж/м^2), требуемой для разрушения различных горных пород. Более плотные и прочные породы (базальт, гранит) требуют больших энергозатрат, что согласуется с теорией разрушения хрупких материалов. Исходя из данных, полученных авторами, крупность частиц обратно пропорциональна энергоэффективности, а также минимизация энергопотребления достигается за счет коэффициента трения и гранулометрии материала.

Несмотря на широкое применение технологии холодного фрезерования, оценка энергозатрат этого процесса остается сложной задачей. В настоящее время существует множество подходов для определения энергетических затрат при дроблении каменных материалов. Однако эти подходы имеют ряд ограничений: большинство существующих методов фокусируются на оценке энергозатрат, связанных с разрушением каменной фракции, тогда как процесс разрушения битумных связей остается малоизученным. В то же время точная оценка энергозатрат требует учета площади вновь образованных поверхностей, однако существующие методы гранулометрического анализа не всегда позволяют получить достоверные данные из-за сложности формы частиц и их неоднородности. В рамках настоящего исследования используется энергетический подход, связывающий затраты энергии с образованием новых поверхностей. Этот метод требует экспериментального подтверждения и адаптации к условиям фрезерования асфальтобетона, что делает его актуальным для дальнейшего изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения энергетических параметров рабочего процесса фрезерования асфальтобетона, при котором происходит разрушение не только битумных связей между частицами

заполнителя, но и самого заполнителя, требуется проанализировать фракционный состав асфальтобетонного гранулята. Одним из основных показателей, определяющих затраты энергии при разрушении асфальтобетонного покрытия, является образование новых поверхностей в процессе фрезерования. Исходя из этого, увеличение суммарной площади вновь образованных частиц асфальтобетонного гранулята будет сигнализировать об увеличении затраченной энергии на их формирование. Однако определение гранулометрического состава⁸ позволяет оценить только распределение частиц по фракциям и не дает представления об энергетических затратах. Чтобы выявить зависимость между возникающими энергозатратами при фрезеровании асфальтобетона и геометрией частиц асфальтобетонного гранулята, необходимо определить площадь поверхности фракций разрушенного материала. Для определения геометрических параметров частиц материала применяется технология трехмерного сканирования, которая обеспечивает де-

талированную модель гранул, образованных в процессе фрезерования.

В процессе ремонта одной из придорожной территории г. Ярославля с применением технологии холодного фрезерования было получено два набора асфальтобетонного гранулята из асфальтобетона марки Б⁹ типа 2. Первый и второй наборы асфальтобетонного гранулята получены с применением двух фрезерных барабанов, отличающихся только схемой расстановки режущих элементов (рисунок 1). Размеры фрезеруемой выемки, скорость подачи фрезерного оборудования и температура асфальтобетона не изменялись. Комплекты режущих элементов на двух барабанах использовались одинаковой модели А6/20¹⁰. Расстановка режущих элементов основана на гипотезе о том, что нелинейная характеристика резания асфальтобетонного материала позволяет использовать новый тип расстановки режущих элементов с максимальной площадью сечения срезаемой стружки, снизив общие затраты энергии.

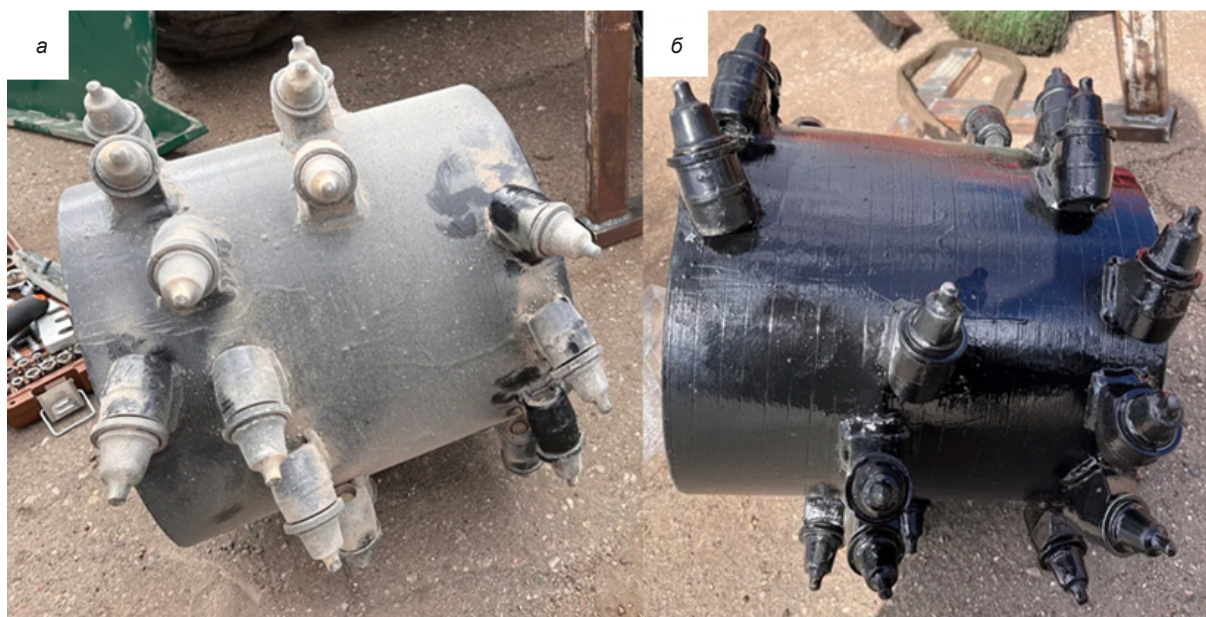


Рисунок 1 – Сменные фрезерные барабаны: а – фрезерный барабан № 1; б – фрезерный барабан № 2
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Replaceable milling drums. а – milling drum №1, б – milling drum № 2
Source: compiled by the authors.

⁸ ГОСТ 33029–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

⁹ ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.

¹⁰ ОАО «КЗТС». Оригинальная конструкция дорожных резцов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Road.pdf (дата обращения: 25.03.2023).

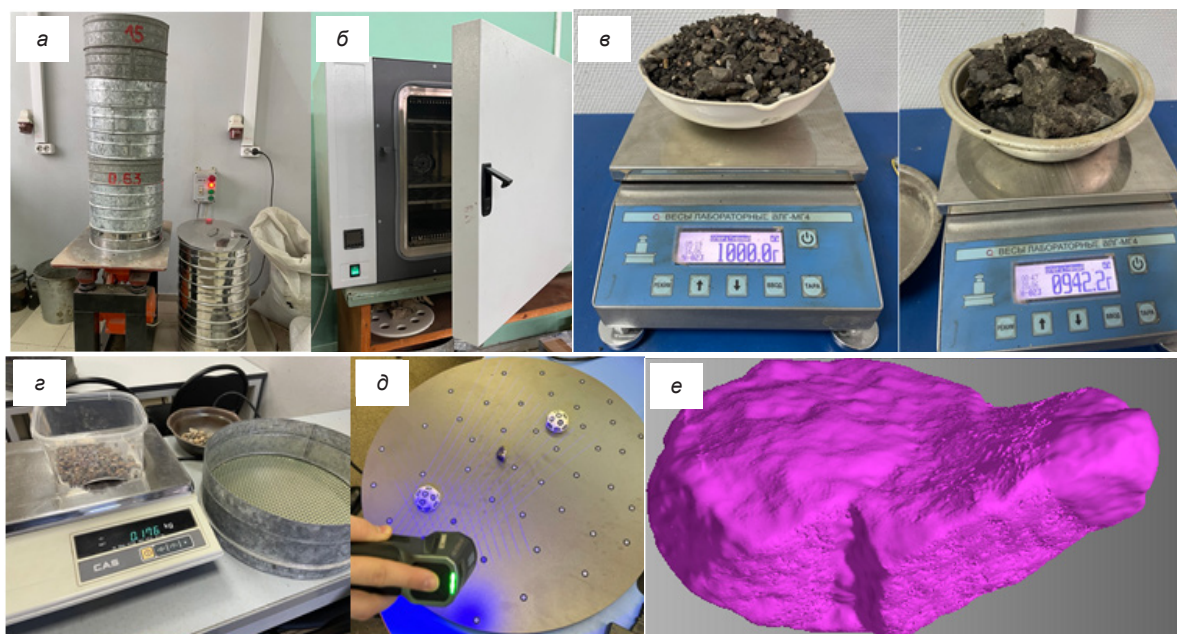


Рисунок 2 – Определение геометрических параметров щебня:
 а – просеивание асфальтового гранулята в ситах стандартного сечения;
 б – выжигание органического вяжущего в печи;
 в – рассеянные фракции асфальтобетонного гранулята и отдельных конгломератов асфальтобетона;
 г – определение массовой доли каждой фракции; д – процесс сканирования;
 е – образец полученной 3D-модели частицы щебня
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Determination of the geometric parameters of crushed stone:
 a – sieving asphalt granulate in the sieves with the standard cross-section;
 b – burning out the organic binder in the furnace;
 c – dispersed fractions of asphalt granulate and separate asphalt concrete conglomerates;
 d – determination of the share mass of each fraction; e – scanning process;
 e – sample of the obtained 3D model of the crushed stone particle
 Source: compiled by the authors.

Полученный асфальтобетонный гранулят рассеивался в ситах с круглыми отверстиями¹¹ диаметром 20, 15, 10, 5, 3, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм на вибрационной установке (рисунок 2, а). Рассеянные фракции гранулята, а также отдельные конгломераты асфальтогранулята (рисунок 2, в) были подвергнуты термической обработке в муфельной печи (рисунок 2, б) при температуре 500 °С с целью выжигания органического вяжущего¹². После этого повторялась процедура отсева для полученного каменного материала в том же наборе сит с

дальнейшим взвешиванием каждой фракции на лабораторных весах¹³ (рисунок 2, в). Далее из фракций, оставшихся над ситами с отверстиями 15, 10 и 5 мм, были отобраны по три образца, которые в дальнейшем сканировались (рисунок 2, д). В рамках данной работы выбор трех фракций для трехмерного сканирования ограничен возможностями оборудования. По полученным полигональным моделям определяется площадь поверхности и объем каждого образца (рисунок 2, е).

¹¹ ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.

¹² ГОСТ 58401.15–2019. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон. Определение содержания битумного вяжущего методом выжигания. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

¹³ ГОСТ 24104–2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2007. 8 с.

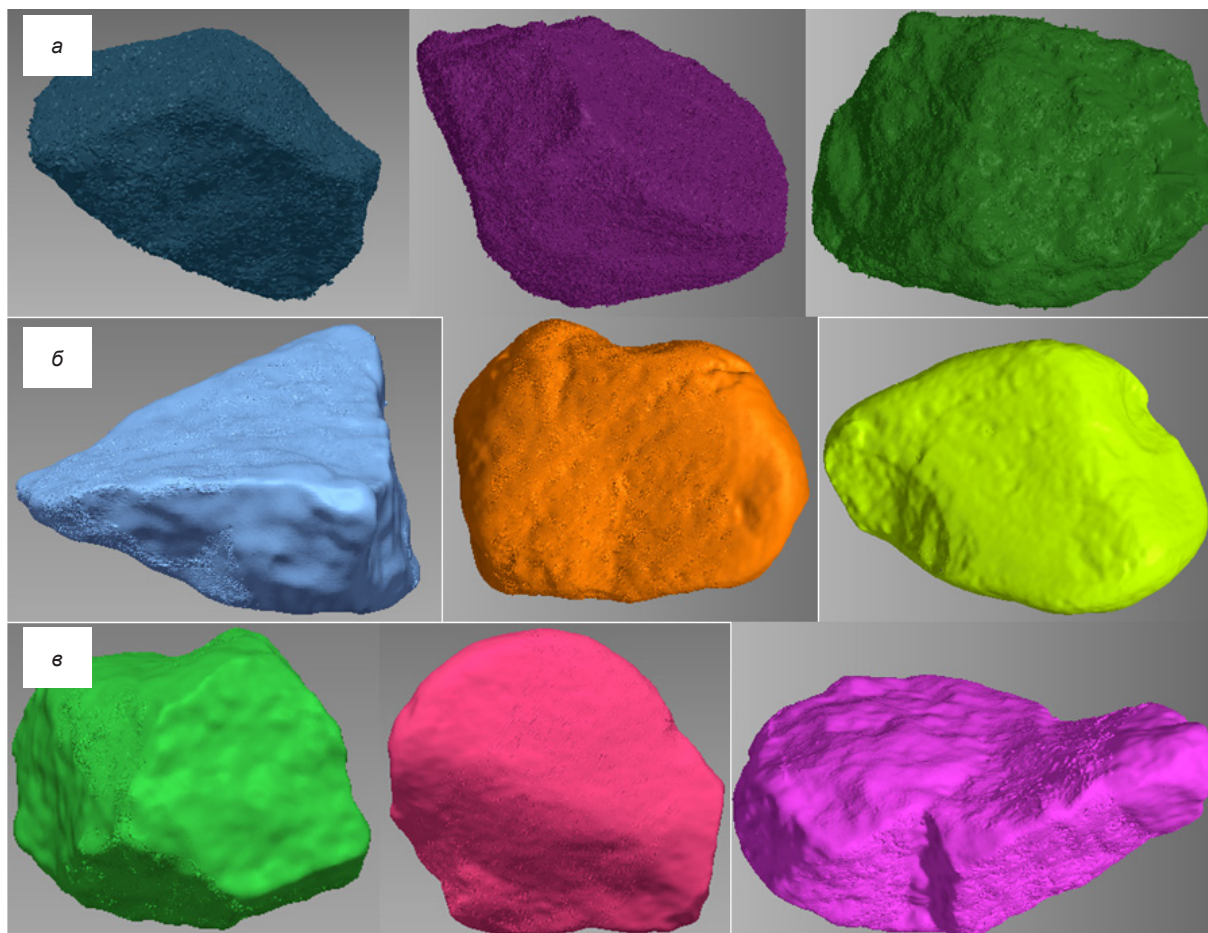


Рисунок 3 – Примеры полигональных моделей для:
 а – асфальтобетонного гранулята, оставшегося над ситами 5, 10, 15 мм соответственно;
 б – каменной фракции, оставшейся над ситами 5, 10, 15 мм соответственно и полученной
 в ходе выжигания органического вяжущего из асфальтобетонного гранулята;
 в – каменной фракции, оставшейся над ситами 5, 10, 15 мм соответственно, полученной в ходе выжигания
 органического вяжущего из отдельных конгломератов асфальтогранулята
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Examples of polygonal models for:
 a – asphalt-concrete granulate remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively;
 б – stone fraction remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively, and obtained during
 the burning out of organic binder from asphalt-concrete granulate;
 в – stone fraction remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively,
 obtained during the burning out of organic binder from separate asphalt granulate conglomerates
 Source: compiled by the authors.

Исходя из методики, представленной в работе [18], возможно определить затраты энергии на образование новых поверхностей. Так, удельная работа, затрачиваемая непосредственно на разрушение материала, включает две составляющие:

$$A_{\text{изм}} = A_1 + A_2, \quad (4)$$

где A_1 – удельная работа, затрачиваемая на разрушение битумных связей, Дж/кг;

A_2 – удельная работа, затрачиваемая на дробление каменной фракции, Дж/кг.

Таким образом, определить затрачиваемую энергию на разрушение битумных связей возможно по следующей формуле:

$$A_1 = k_1 \cdot (S_{\text{сум}} - (S_3 - S_2)), \quad (5)$$

где k_1 – удельная энергия разрушения битумных связей (из работы [18], $k_1 = 1279$ Дж/м²).

$S_{\text{сум}}$ – суммарная удельная площадь новых поверхностей всех фракций асфальтобетонного гранулята, м²/кг.

$S_{3,2}$ – суммарная удельная площадь поверхностей каменной фракции до и после процесса фрезерования, мм²/г.

В свою очередь, затрачиваемая энергия на дробление каменной фракции определяется по формуле

$$A_2 = k_2 \cdot (S_3 - S_2), \quad (6)$$

где k_2 – удельная энергия разрушения щебня (из работы [17], $k_2 = 140$ Дж/м²).

Для определения площадей поверхности асфальтобетонного гранулята, а также каменной фракции с выжженной органической

частью до и после процесса фрезерования используется технология трехмерного сканирования. Так, отбираются по 3 образца из фракций, оставшихся над ситами с диаметром отверстий 5, 10, 15 мм и сканируются с разрешением 0,05 мм/м. Примеры полученных в ходе сканирования полигональных моделей асфальтобетонного гранулята и каменных фракций из асфальтобетонного гранулята (после фрезерования), а также отдельных конгломератов асфальтогранулята (до фрезерования) приведены на рисунке 3. Значения полученных площадей образцов представлены в таблице 1, а их объемов в таблице 2. График зависимости площади поверхности и объема измеряемого материала представлен на рисунке 4.

Таблица 1

Результаты измерения площадей полигональных моделей

Источник: составлено авторами.

Table 1

Results of measuring the areas of polygonal models

Source: compiled by the authors.

| Диаметр отверстия сита, мм | Усредненная площадь поверхности асфальтобетонного гранулята, мм ² | Усредненная площадь каменной фракции после фрезерования, мм ² | Усредненная площадь каменной фракции до фрезерования, мм ² |
|--|--|--|---|
| 5 | 407.176 | 269.839 | 282.5536 |
| 10 | 893.42 | 615.0587 | 640.0195 |
| 15 | 1873,953 | 977,3034 | 991,18 |
| Уравнение регрессии | $A_1 = 43,578 \cdot d^{1.362}$ | $A_1 = 40,949 \cdot d^{1.1733}$ | $A_1 = 44,927 \cdot d^{1.1464}$ |
| Значение достоверности аппроксимации, R ² | 0,9824 | 0,987 | 0,995 |

Таблица 2

Результаты измерения объема полигональных моделей

Источник: составлено авторами.

Table 2

Results of measuring the volume of polygonal models

Source: compiled by the authors.

| Диаметр отверстия сита, мм | Усредненный объем асфальтобетонного гранулята, мм ³ | Усредненный объем каменной фракции после фрезерования, мм ³ | Усредненный объем каменной фракции до фрезерования, мм ³ |
|--|--|--|---|
| 5 | 376.63 | 302.7273 | 316.9877 |
| 10 | 1442.07 | 1126.583 | 1172.303 |
| 15 | 4913.49 | 1887.726 | 1914.53 |
| Уравнение регрессии | $V_1 = 8.7687 \cdot d^{2.2947}$ | $V_1 = 20.696 \cdot d^{1.6908}$ | $V_1 = 22.707 \cdot d^{1.6639}$ |
| Значение достоверности аппроксимации, R ² | 0.9847 | 0.9907 | 0.9887 |

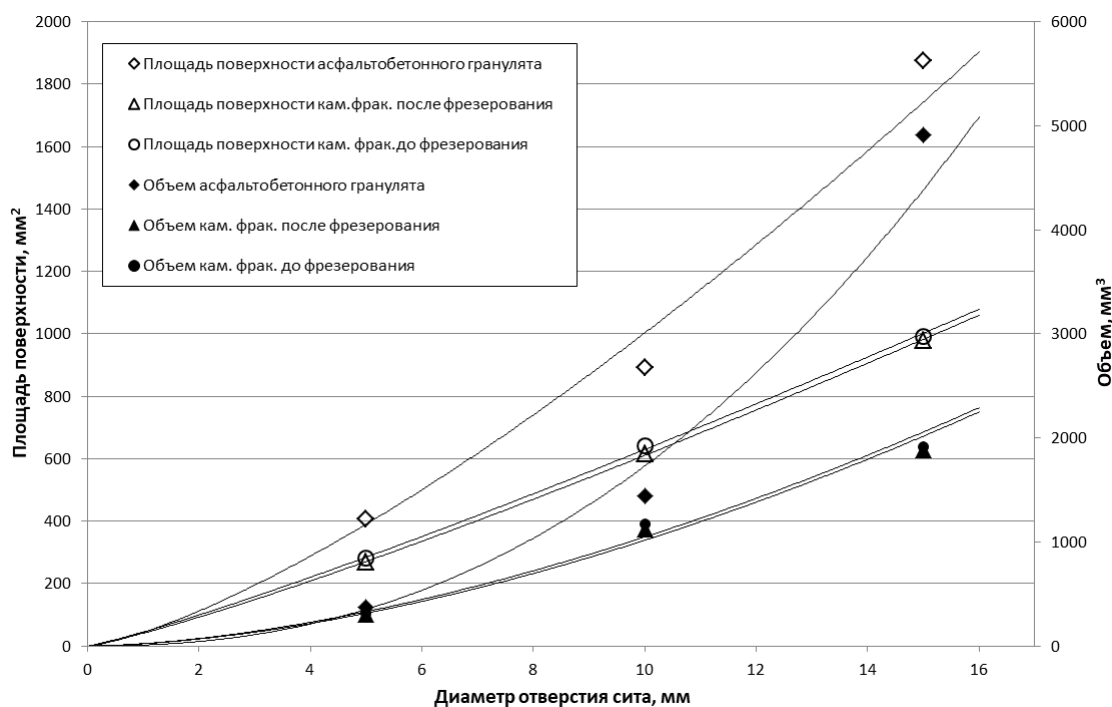


Рисунок 4 – Графики зависимости площади поверхности и объема асфальтобетонного гранулята и каменной фракции до и после фрезерования от размеров отверстия сита
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphs of the dependence of the surface area and volume of asphalt concrete granulate and stone fraction before and after milling on the sieve opening size
Source: compiled by the authors.

В свою очередь, суммарная удельная площадь поверхности всех фракций может быть определена исходя из зависимости

$$S_{y\partial} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot \delta_i}{\rho \cdot V_i}, \quad (7)$$

где A_i – средняя площадь поверхности, м²;
 δ_i – массовая доля каждой фракции, %;
 V_i – средний объем частицы, м³;
 ρ – плотность частицы, кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По представленной методике производилась косвенная оценка количества расходуемой энергии на удаление асфальтобетонных

покрытий в процессе холодного фрезерования. Исходя из зависимости (7) и уравнений регрессии, представленных в таблицах 1 и 2, возможно определить суммарные площади для фракций асфальтобетонного гранулята (таблица 3) и минерального заполнителя до (таблица 4) и после фрезерования (таблица 5). Плотность асфальтобетонного гранулята определялась путем взвешивания тары фиксированного объема, наполненной материалом, затем полученное значение массы материала делится на объем тары. Таким образом, средняя плотность асфальтобетонного гранулята, полученного из асфальтобетона марки Б типа 2, составляет 1880 кг/м³. Плотность каменного материала примем 2650 кг/м³ [12].

Таблица 3

Удельная площадь фракций асфальтобетонного гранулята
Источник: составлено авторами.

Table 3

Specific area of asphalt concrete granulate fractions
Source: compiled by the authors.

| Диаметр отверстия сита, мм | Массовая доля (фрез. барабан № 1), % | Массовая доля (фрез. барабан № 2), % | Усредненная площадь поверхности, м ² | Усредненный объем, м ³ | Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 1), м ² /кг | Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 2), м ² /кг |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--|--|
| 15 | 16.1 | 18.8 | $1873.953 \cdot 10^{-6}$ | $4913.49 \cdot 10^{-9}$ | 0.03266 | 0.03814 |
| 10 | 14.1 | 22.2 | $893.42 \cdot 10^{-6}$ | $1442.07 \cdot 10^{-9}$ | 0.04645 | 0.07315 |
| 5 | 29.6 | 26.0 | $407.176 \cdot 10^{-6}$ | $376.63 \cdot 10^{-9}$ | 0.17022 | 0.1495 |
| 3 | 13.1 | 11.5 | $194.5837 \cdot 10^{-6}$ | $109.09 \cdot 10^{-9}$ | 0.12429 | 0.1091 |
| 1.25 | 11.0 | 9.6 | $59.055 \cdot 10^{-6}$ | $14.63 \cdot 10^{-9}$ | 0.23614 | 0.2061 |
| 0.63 | 7.9 | 6.3 | $23.226 \cdot 10^{-6}$ | $3.037 \cdot 10^{-9}$ | 0.32133 | 0.25625 |
| 0.315 | 5.6 | 3.8 | $9.036 \cdot 10^{-6}$ | $0.62 \cdot 10^{-9}$ | 0.43479 | 0.295 |
| 0.16 | 1.7 | 1.1 | $3.6 \cdot 10^{-6}$ | $0.13 \cdot 10^{-9}$ | 0.24828 | 0.16065 |
| Поддон | 0.9 | 0.7 | - | - | 0.01466 | 0.009 |
| Суммарная удельная площадь: | | | | | 1.62885 | 1.297 |

Таблица 4

Удельная площадь фракций минерального заполнителя до процесса фрезерования
Источник: составлено авторами.

Table 4

Specific area of mineral aggregate fractions before the milling process
Source: compiled by the authors.

| Диаметр отверстия сита, мм | Массовая доля (обр. № 1), % | Массовая доля (обр. № 2), % | Усредненная площадь поверхности, м ² | Усредненный объем, м ³ | Удельная площадь фракции (обр. № 1), м ² /кг | Удельная площадь фракции (обр. № 2), м ² /кг |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|---|---|
| 15 | 11.6 | 8.1 | $991.18 \cdot 10^{-6}$ | $1914.53 \cdot 10^{-9}$ | 0.02266 | 0.01582 |
| 10 | 9.5 | 11.8 | $640.0195 \cdot 10^{-6}$ | $1172.303 \cdot 10^{-9}$ | 0.019572 | 0.02431 |
| 5 | 16.3 | 16.5 | $282.5536 \cdot 10^{-6}$ | $316.9877 \cdot 10^{-9}$ | 0.054827 | 0.0555 |
| 3 | 7.5 | 7.9 | $158.3 \cdot 10^{-6}$ | $141.2674 \cdot 10^{-9}$ | 0.031714 | 0.0334 |
| 1.25 | 9.8 | 10.3 | $58.024 \cdot 10^{-6}$ | $32.9161 \cdot 10^{-9}$ | 0.065189 | 0.0685 |
| 0.63 | 11.1 | 11.1 | $26.45 \cdot 10^{-6}$ | $10.526 \cdot 10^{-9}$ | 0.10526 | 0.1053 |
| 0.315 | 14.2 | 14.1 | $11.95 \cdot 10^{-6}$ | $3.322 \cdot 10^{-9}$ | 0.19276 | 0.1914 |
| 0.16 | 9.3 | 8.6 | $5.496 \cdot 10^{-6}$ | $1.076 \cdot 10^{-9}$ | 0.17924 | 0.16575 |
| Поддон | 10.7 | 11.6 | - | - | 0.08043 | 0.0866 |
| Суммарная удельная площадь: | | | | | 0.751659 | 0.7466 |

Таблица 5
Удельная площадь фракций минерального заполнителя после процесса фрезерования
Источник: составлено авторами.

Table 5
Specific area of mineral aggregate fractions after the milling process
Source: compiled by the authors.

| Диаметр сита, мм | Массовая доля (фрез. барабан № 1), % | Массовая доля (фрез. барабан № 2), % | Усредненная площадь поверхности, м ² | Усредненный объем, м ³ | Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 1), м ² /кг | Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 2), м ² /кг |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--|--|
| 15 | 7.1 | 9.8 | 977.3·10 ⁻⁶ | 1887.726·10 ⁻⁹ | 0.01387 | 0.01915 |
| 10 | 10.1 | 12.2 | 615.06·10 ⁻⁶ | 1126.583·10 ⁻⁹ | 0.0208 | 0.02513 |
| 5 | 18.8 | 17.9 | 269.84·10 ⁻⁶ | 302.73·10 ⁻⁹ | 0.0632 | 0.060201 |
| 3 | 8.4 | 8.4 | 148.61·10 ⁻⁶ | 132.62·10 ⁻⁹ | 0.03552 | 0.03552 |
| 1.25 | 9.1 | 9.1 | 53.2·10 ⁻⁶ | 30.182·10 ⁻⁹ | 0.0605 | 0.06053 |
| 0.63 | 11.1 | 13.7 | 23.8·10 ⁻⁶ | 9.475·10 ⁻⁹ | 0.10526 | 0.12992 |
| 0.315 | 15.8 | 18.1 | 10.56·10 ⁻⁶ | 2.935·10 ⁻⁹ | 0.2145 | 0.24571 |
| 0.16 | 10 | 7.9 | 4.77·10 ⁻⁶ | 0.934·10 ⁻⁹ | 0.1927 | 0.15227 |
| Поддон | 9.6 | 2.9 | - | - | 0.075 | 0.02175 |
| Суммарная удельная площадь: | | | | | 0.7814 | 0.75019 |

Исходя из результатов, представленных в таблицах 3,4,5, возможно определить удельную энергию, затрачиваемую на разрушение битумных связей и минерального заполнителя по формулам (5) и (6) соответственно. Таким образом, удельная работа, затрачиваемая на разрушения битумных связей фрезерным барабаном № 1, равна 2045.157 Дж/кг, когда у фрезерного барабана № 2 1654.288 Дж/кг. В свою очередь, удельная работа, расходуемая на разрушение каменной фракции фрезерным барабаном № 1 составляет 4.175 Дж/кг, в то же время энергия, расходуемая на разрушение минеральной составляющей асфальтобетона в процессе работы фрезерного барабана № 2 всего 0.506 Дж/кг.

Полученный результат в первую очередь указывает на то, что в процессе фрезерования практически вся энергия уходит на разрушение битумных связей, что подтверждает результаты работы [18]. Суммарная удельная работа измельчения, затраченная в процессе фрезерования, исходя из формулы (4) для фрезерного барабана № 1 будет равна 2049.332 Дж/кг и для фрезерного барабана № 2 1654.764 Дж/кг. Таким образом, расстановка режущих эле-

ментов по поверхности фрезерного барабана № 2 является эффективнее с точки зрения затрачиваемой энергии более чем на 19.25%.

Вероятно, фракционный состав асфальтобетонного гранулята зависит от расположения режущих элементов, что может позволить регулировать его с заданной точностью. Так, обратив внимание на рисунок 5, легко заметить, что в процессе работы фрезерного барабана № 2 крупной фракции образуется больше и в то же время меньше мелкой фракции в сравнение с фрезерным барабаном № 1.

Для определения полных затрат энергии на разрушение битумных связей при фрезеровании воспользуемся зависимостью затрачиваемой удельной энергии на разрушение каждой фракции асфальтобетонного гранулята, полученного при фрезеровании разными фрезерными барабанами (рисунок 6). Если затраты энергии пропорциональны площади поверхности частиц, то для оценки затрат энергии достаточно определить площади под графиками. В упрощенном виде уравнение (8) можно представить как сумму произведений удельных поверхностей всех фракций на удельную энергию разрушения битумных связей.

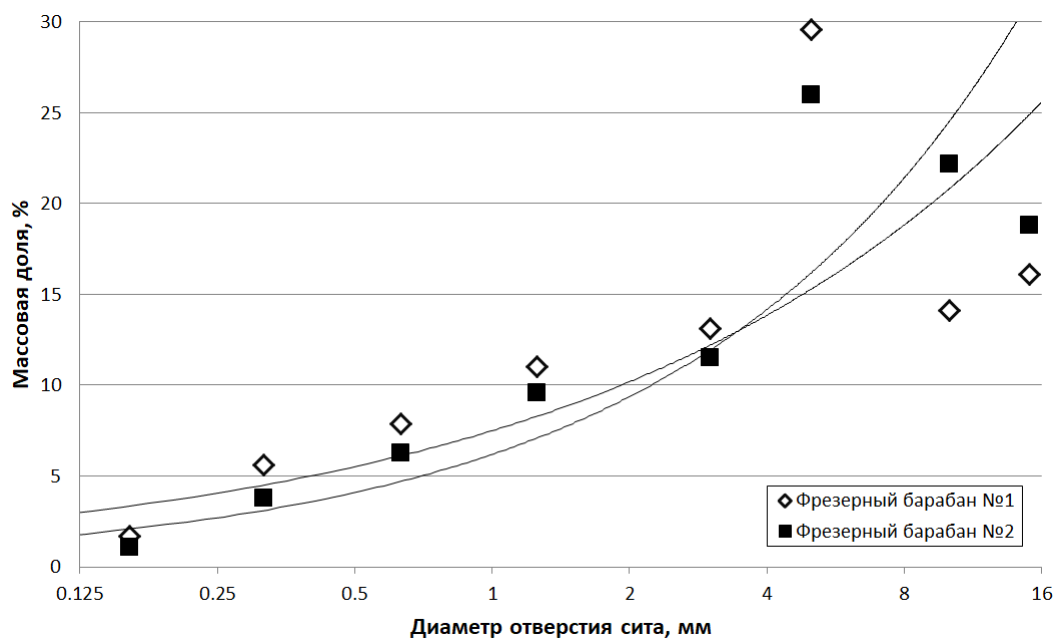


Рисунок 5 – График зависимости массовой доли асфальтобетонного гранулята от его размеров
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the asphalt concrete granulate mass share on its size
 Source: compiled by the authors.

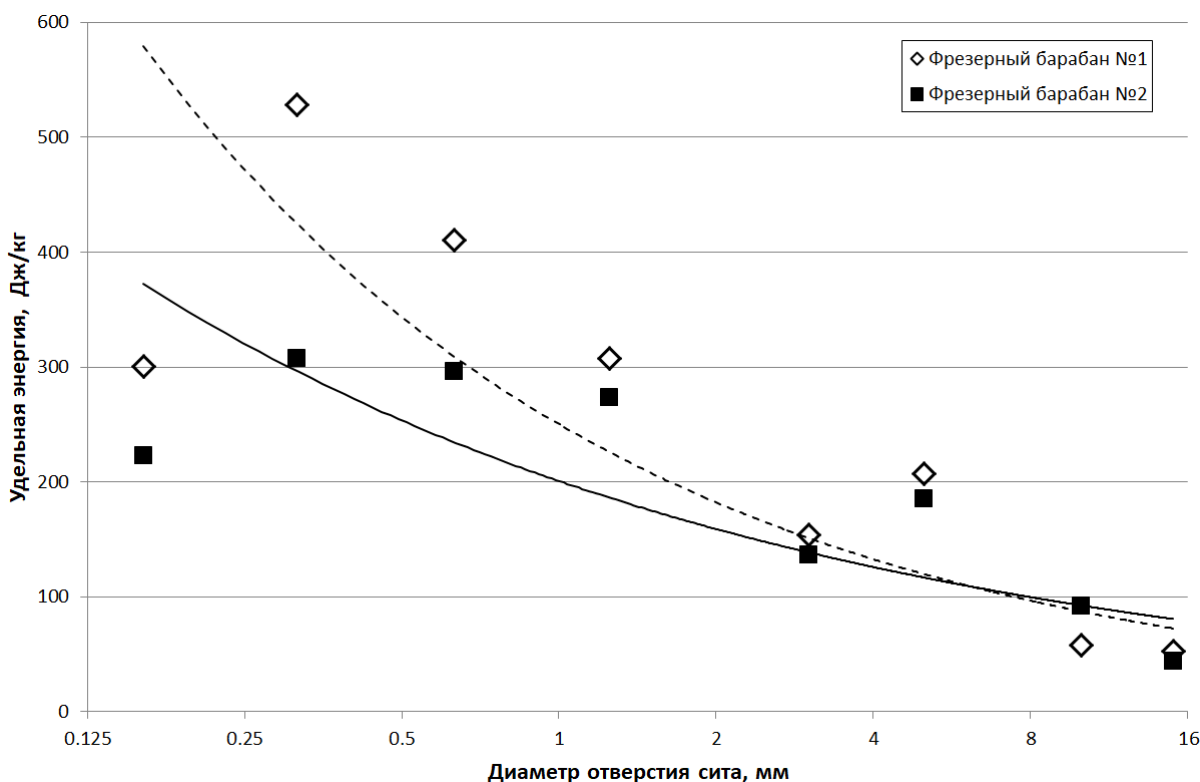


Рисунок 6 – График зависимости удельных энергий каждой фракции от размеров асфальтобетонного гранулята
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graph of the dependence of the specific energies of each fraction on the size of the asphalt concrete granulate.
 Source: compiled by the authors.

$$A_1 = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} a \cdot d^n dx \approx \sum_{i=1}^n S_{уд,i} \cdot k_1, \quad (8)$$

где A_1 – энергия, затрачиваемая на разрушение битумных связей, Дж/кг;

a – эмпирический коэффициент;

n – показатель степени, зависящий от свойств материала;

$S_{уд,i}$ – удельная площадь поверхности каждой фракции, м²/кг;

k_1 – удельная энергия разрушения битумных связей (из работы [18], $k_1 = 1279$ Дж/м²).

Энергия, затрачиваемая на разрушения битумных связей при работе фрезерного барабана № 1, составляет 2083,3 Дж/кг, для фрезерного барабана № 2 всего 1658,9 Дж/кг. Сравнение ранее полученных значений с данными из зависимости (8) демонстрируют расхождение результатов с погрешностью не более 2%. Это позволяет определять затраты энергии на разрушение битумных связей, не прибегая к определению площади поверхностей каменной фракции до и после фрезерования.

Исходя из полученных результатов, сделаны следующие выводы:

1. До фрезерования и после фрезерования закономерности развития удельных поверхностей каменной фракции (см. рисунок 4) асфальтобетона практически не отличаются и можно использовать следующие обобщенные уравнения регрессии для определения площади (9) и объема (10).

$$A_i = 42.918 \cdot d^{1.1596}; \quad (9)$$

$$V_i = 21.692 \cdot d^{1.6771}. \quad (10)$$

2. Для определения битумоемкости при рециклинге или вторичном использовании асфальтобетонного гранулята получены зависимости для определения площади поверхности (11) и объема (12). Они позволяют более точно определять удельно площадь поверхности гранул асфальтобетона, а значит и наиболее качественно производить подбор необходимого количества битума и минеральных добавок.

$$A_i = 43.578 \cdot d^{1.362}; \quad (11)$$

$$V_i = 8.7687 \cdot d^{2.2947}. \quad (12)$$

3. Как видно из рисунка 5, фрезерный барабан № 2 образует крупную фракцию больше и существенно меньше мелкой фракции в сравнении с барабаном № 1. Это демонстрирует, что фрезерный барабан № 1 тратит больше энергии на образование новых поверхностей.

4. Основная часть энергии при фрезеровании асфальтобетонных покрытий расходуется на разрушение битумных связей, тогда как на дробление каменной фракции затрачивается значительно меньше энергии. Это указывает на важность дальнейшего изучения процессов, связанных с разрушением битумных связей, для снижения энергопотребления.

5. Полученные результаты наглядно демонстрируют влияние расположения режущих элементов на фрезерном барабане. Это указывает на возможность оптимизации конструкции фрезерного барабана с точки зрения потребляемой энергии в процессе фрезерования.

6. Методика, предложенная в работе, может быть рекомендована не только для оценки энергозатрат при фрезеровании асфальтобетона, но и для других процессов измельчения твердых материалов и дисперснонаполненных композитов.

7. Энергозатраты зависят от таких факторов, как толщина срезаемой стружки, температура асфальтобетона и конструктивные параметры оборудования. Например, увеличение толщины стружки и снижение температуры материала приводят к росту энергопотребления. Эти факторы нужно учитывать при проектировании и эксплуатации фрезерного оборудования.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование вносит важный вклад в совершенствование методов оценки энергопотребления при фрезеровании и предлагает эффективный подход для снижения энергетических затрат в дорожной отрасли. Разработанная методика позволяет точнее определять расход энергии и может быть использована для повышения экономической и экологической эффективности ремонтных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юсуфов А.С., Магомедалиев Г.Г., Дагиров А.Р., Хиясов М.А. Анализ износостойкости асфальтобетона // *E-Scio*. 2019. № 7(34). С. 77–85. EDN BGTSGW.
2. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И. и др. Применение асфальтогранулята при ремонте дорог Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. № 1(94). С. 43–52. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_43. EDN ROVZPT.
3. Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Лысаков Н.Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 204–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>
4. Шамахов Л.М., Фурманов Д.В. Влияние износа режущих элементов на эффективность работы дорожной фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2025. Т. 92, № 2. С. 204–212. DOI: 10.17816/0321-4443-634723 EDN: XTCICV
5. Фурманов Д.В., Шаманов Л.М., Лысов Н.Э. Сравнительный анализ энергоёмкости фрезерования новых марок асфальтобетонов // *Строительные и дорожные машины*. 2023. № 1. С. 24–28. EDN TILVYQ.
6. Furmanov D.V., Lysakov N. E., Shamakhov L. M. Effect of asphalt concrete strength properties on energy intensity of milling // *Journal of Physics: Conference Series*: 5, Omsk, 16–17 марта 2021 года. Omsk, 2021. P. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1901/1/012086. EDN ARQQDE.
7. Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamakhov L. M. Study of Asphalt Milling Workflow Dynamics // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 442–450. DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_54. EDN ULFPPK.
8. Бордюг А.С. Применение оптоволоконной оптической системы для контроля крутящего момента вала // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2021. № 3. С. 101–106. DOI 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106. EDN VMWLZW.
9. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Влияние исследуемых факторов на мощность фрезерования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17, № 2-4. С. 896–899. EDN UMEJOP.
10. Бусел А.В., Буко А.Н. Получение доломитового щебня в центробежноударной дробилке // *Наука и техника*. 2013. № 1. С. 53–56. EDN STBDXF.
11. Заднепровский Р.П. Энергетика измельчения материалов различного физического состояния // *Технологии бетонов*. 2014. № 7(96). С. 11–15. EDN TAQKER.
12. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 1. С. 71–79. DOI 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.
14. Читалов Л.С., Львов В.В. Сравнительная оценка методов определения рабочего индекса шарового измельчения бонда // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 1. С. 130–145. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145. EDN BDVFJD.
15. Гурьянов Г.А., Абдеев Б.М., Клименко Е.А. Прикладная модель измельчения твердой частицы простой формы ударом о жесткую поверхность // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2018. № 1. С. 110–120. DOI 10.15593/perm.mech/2018.1.10. EDN YUPFAN.
16. Tromans D. Mineral comminution: Energy efficiency considerations // *Minerals Engineering*. 2008. Vol. 21. P. 613–620.
17. 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 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87. EDN VZGVFP.
18. Фурманов Д.В., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-мастичного асфальтобетонного гранулята // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 6. С. 852–866. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

REFERENCES

1. Yusufov A.S., Magomedaliev G.G., Dagirov A.R., Hiyasov M.A. Analysis of the wear resistance of asphalt concrete. *E-Scio*. 2019; 7(34): 77-85. (In Russ.). EDN BGTSGW.
2. Alexikov S.V., Leskin A.I., Hoffman D.I. et al. The use of asphalt granulate in the repair of roads in Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024; 1(94): 43-52. (In Russ.). DOI 10.35211/18154360_2024_1_43. EDN ROVZPT
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.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN: KLHYLT
4. Shamakhov L.M., Furmanov D.V. The effect of wear of cutting elements on the efficiency of a road milling cutter. *Tractors and agricultural machinery*. 2025; 92(2): 204-212. (In Russ.). DOI: 10.17816/0321-4443-634723. EDN: XTCICV
5. Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Lysakov N.E. Comparative analysis of the energy intensity of milling new grades of asphalt concrete. *Construction and road machinery*. 2023; 1:24-28. (In Russ.). EDN TILVYQ.

6. Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Lysakov N.E. Effect of asphalt concrete strength properties on energy intensity of milling. *Journal of Physics: Conference Series: 5, Omsk, 2021*; p. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1901/1/012086. EDN AR-QQDE.

7. Furmanov D.V., Lysakov N.E., Shamakhov L.M. Study of Asphalt Milling Workflow Dynamics. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022; P. 442-450. DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_54. EDN ULFPPK.

8. Bordyug A.S. Application of a fiber-optic optical system for controlling shaft torque. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology*. 2021; 3: 101-106. (In Russ.). DOI 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106. EDN VMWLZW.

9. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. The influence of the studied factors on milling power. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 17, 2(4): 896-899. (In Russ.). EDN UMEJOP.

10. Busel A.V., Buko A.N. Obtaining dolomite crushed stone in a centrifugal impact crusher. *Science and Technology*. 2013; 1: 53-56. (In Russ.). EDN STB-DXF

11. Zadneprovsky R.P. The power engineering of grinding materials of various physical conditions. *Technologies of concrete*. 2014; № 7(96): 11-15. (In Russ.). EDN TAQKEP.

12. Simonov P.S. Experimental study of rock crushing by a single impact. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 1: 71-79. (In Russ.). DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79. EDN VIEZDF.

13. Romanyuk V.N. Exergy of asphalt concrete mix. Energy. *Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2003; 4: 69-76. (In Russ.). EDN GDOLBM

14. Chitalov L.S., Lviv V. Comparative evaluation of methods for determining the working index of bond ball grinding. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 1: 130-145. (In Russ.). DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145. EDN BDVFJD.

15. Guryanov G.A., Abdeev B.M., Klimenko E.A. An applied model of crushing a simple solid particle by impact on a hard surface. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2018; 1: 110-120. (In Russ.). DOI 10.15593/pern.mech/2018.1.10. EDN YUPFAN.

16. Tromans D. Mineral comminution: Energy efficiency considerations. *Minerals Engineering*. 2008; 21: 613–620.

17. Golik V.I., Kojiev H.H., Golodov M.A., Armeisikov V.N. Investigation of the properties of rocks during crushing and grinding in mechanical mills. *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2021; 2(62): 81-87. (In Russ.). DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87. EDN VZGVFP

18. Furmanov D.V., Budanova E.S. Efficiency evaluation of the milling process based on the granu-

lometric analysis of crushed stone-mastic asphalt concrete granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 852-866. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

Furmanov. Denis V. Organization of the author's team work, formulating the research problem and direction, setting the objectives and methodology for the research conducting, correction of the article material.

Shamakhov Leonid M. Review of the previous studies, preparing and conducting experimental studies, processing of the obtained data, collecting of the article material.

Ekaterina S. Budanova. Arranging and conducting experimental studies, processing the obtained results, working out individual materials for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

SPIN-код: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

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

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

SPIN-код: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

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

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

SPIN-code: 7600-9464,

e-mail: Cat156026@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Furmanov Denis V. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Prospekt, Yaroslavl, 150023)

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

SPIN-code: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Shamakhov Leonid M. – Postgraduate Student, Assistant, Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Prospekt, Yaroslavl, 150023).

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

SPIN-code: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

Budanova Ekaterina S. – Postgraduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), (64, Leningradskiy Prospekt, Moscow, 125319)

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

SPIN-code: 7600-9464.

e-mail: Cat156026@yandex.ru