

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 67.08

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-64-77

Моделирование процесса измельчения частиц асфальтобетона с использованием новой конструкции центробежной мельницы

А.Е. Лебедев, А.С. Суханов, А.А. Мурашов, А.И. Холодкова

Антон Евгеньевич Лебедев¹

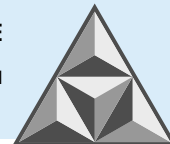
¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
lae4444@mail.ru

Алексей Сергеевич Суханов²

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
Москва, Российская Федерация
dorexpert@yandex.ru

Анатолий Александрович Мурашов³, Александра Ивановна Холодкова^{3*}

³Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, Ярославль, Российская Федерация
*alena.severyanka@mail.ru, holodkovaa@list.ru**



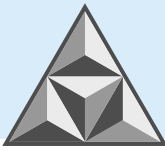
Предлагается актуальное технологическое решение, обеспечивающее продление срока службы рабочих органов центробежно-ударного измельчителя для производства минерального порошка асфальтобетонных смесей. Цель исследования – совершенствование способов и средств математического и физического моделирования конструкции указанного оборудования. Результатом является изготовление эффективных материалов, применяемых в сфере дорожного строительства. Выявлены режимы, при которых снижается износ отбойных элементов и лопастей ускорителей центробежно-ударного измельчителя при работе со щебнем и асфальтовым гранулятом. Приведена расчетная схема оборудования и дано математическое описание процессов образования разреженного и отраженного дисперсного потоков твердых частиц. Сравнение опытных результатов и результатов расчета по математической модели показало, что их расхождение не превышает 10%. Предлагаемая конструкция измельчителя обеспечивает получение качественного строительного материала для дорожных работ и позволяет снизить издержки при изготовлении асфальтобетонной смеси.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, асфальтовый гранулят, центробежно-ударный измельчитель, разреженный дисперсный поток, отраженный дисперсный поток, математическое моделирование

Для цитирования:

Лебедев А.Е., Суханов А.С., Мурашов А.А., Холодкова А.И. Моделирование процесса измельчения частиц асфальтобетона с использованием новой конструкции центробежной мельницы // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 64-77.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-64-77



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-64-77

Simulation of the asphalt concrete particle grinding process employing a novel centrifugal mill configuration

A.E. Lebedev, A.S. Sukhanov, A.A. Murashov, A.I. Kholodkova

Anton E. Lebedev¹

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

lae4444@mail.ru

Aleksej S. Sukhanov²

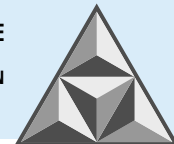
²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

dorexpert@yandex.ru

Anatoly A. Murashov³, **Aleksandra I. Kholodkova**^{3,*}

³Yaroslavl Higher Military School of Air Defense named after Marshal of the Soviet Union L.A. Govorov, Yaroslavl, Russian Federation

*alena.severyanka@mail.ru, holodkovaa@list.ru**



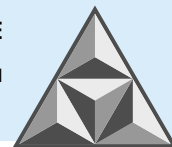
This paper presents a relevant technological solution aimed at extending the service life of the working elements of a centrifugal impact mill used for producing mineral powder for asphalt concrete mixtures. The purpose of the study is to improve the methods and tools for the mathematical and physical modeling of the said equipment's design. The outcome of the research is the production of effective materials for use in the road construction sector. Operating regimes have been identified that reduce wear on the impact elements and accelerator blades of the centrifugal impact mill when processing crushed stone and reclaimed asphalt granulate. The design diagram of the equipment is provided, along with a mathematical description of the processes governing the formation of rarefied and reflected dispersed particle flows. A comparison of experimental results with the calculations based on the mathematical model showed a discrepancy not exceeding 10%. The proposed mill design ensures the production of high-quality construction material for roadworks and enables cost reduction in the receiving of asphalt concrete mixtures.

Keywords: asphalt concrete mix, asphalt aggregate, centrifugal-impact crusher, dilute dispersed flow, reflected dispersed flow, mathematical modeling

For citation:

Lebedev A.E., Sukhanov A.S., Murashov A.A., Kholodkova A.I. Simulation of the asphalt concrete particle grinding process employing a novel centrifugal mill configuration // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 2. P. 64-77. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-64-77



ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных производственных процессов является измельчение дисперсных материалов. В частности, в сфере дорожного строительства получение материалов с определенным размером частиц является важной задачей при подготовке минерального наполнителя – важнейшего структурообразующего компонента асфальтобетонных смесей. Для этих целей используют различные технологии помола и множество конструкций измельчителей [1-3]. Однако при измельчении ряда дорожно-строительных материалов, различающихся по структуре (таких, как асфальтовый гранулят), возникает ряд сложностей.

Известно, что физические процессы, протекающие при разрушении неоднородных частиц асфальтового гранулята, различны по своей природе. Одновременно происходит измельчение ударом, истиранием и сжатием, а также деформация участков частиц при контакте со связующим. Установлено, что дробление частиц строительных материалов, не однородных по составу, эффективно осуществляется в аппаратах центробежно-ударного типа. При этом энергозатраты, по сравнению с другими способами при сопоставимой степени измельчения, относительно невысоки [4].

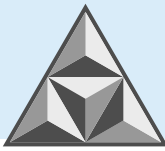
Следует отметить главный недостаток измельчителей ударного действия – быстрый и неравномерный износ деталей оборудования. В процессе их эксплуатации выявлены узлы и участки оборудования, в наибольшей степени подверженные износу. К ним относятся отбойные элементы, лопасти и диски ускорителя. Опытные исследования процесса изнашивания рабочих органов затруднены, так как сам процесс износа скрыт от прямого наблюдения.

При получении минерального порошка для асфальтобетонных смесей с целью повышения ресурса мельницы необходимо повысить надежность и износостойкость ее элементов, в максимальной степени подверженных разрушению. Необходимо отметить, что быстрый износ отбойных элементов и лопастей ускорителя обычно приводит к необходимости остановки агрегата и его ремонту, за счет чего растут издержки производства. Кроме того, попадание продуктов износа в асфальтобетонную смесь может привести к проблемам при контроле ее качества и ухудшению физико-механических свойств.

Одним из вариантов решения этой проблемы является повышение равномерности износа деталей за счет создания одинаковых условий при взаимодействии измельчаемого дорожно-строительного материала с поверхностями отбойных элементов и рабочих органов ускорителя. Такие условия можно создать при изменении конструкции лопастей вращающегося ускорителя. Предлагаемая в настоящей работе конструкция измельчителя предусматривает использование лопастей с карманами самофутеровки специальной формы.

Существенным пробелом, ранее обозначенным в [5, 6], является отсутствие методов расчета и моделирования движения частиц по лопастям центробежно-ударного измельчителя материала, а также процессов образования набегающего и отраженного потоков за пределами ускорителя и их ударного взаимодействия с отбойными элементами. Эксперименты по разрушению неоднородных частиц при производстве асфальтобетонных смесей не носят системный характер и не имеют математического описания.

Цель настоящего исследования – решение вопросов, связанных с организацией механизации и автоматизации работ в сфере дорожного строительства, что служит решению задачи снабжения дорожной отрасли высококачественными асфальтобетонными смесями и изделиями с комплексом заданных физико-механических свойств.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С целью повышения качества асфальтобетонных смесей и дорожных покрытий используют различные технические и технологические решения [7,8], но неизменным остается рост требований к качеству используемых компонентов. Разработка улучшенной конструкции центробежно-ударной мельницы позволит усовершенствовать технологию изготовления материалов, эффективно применяемых в сфере дорожного строительства.

При анализе результатов разрушения деталей центробежно-ударного измельчителя «Титан» (рис. 1) в работе с асфальтовым гранулятом сделан вывод, что неравномерный износ отбойников и лопастей связан с конструктивными особенностями деталей таких устройств. При этом повреждения носят локальный характер и могут не затрагивать большую часть элемента.



Рис. 1. Изношенный отбойный элемент (а); разрушение лопасти и диска ускорителя (б) при измельчении асфальтового гранулята

Fig. 1. Worn impact element (a); blade and disc failure (b) during asphalt granulate crushing

Для устранения неравномерного износа элементов центробежно-ударного измельчителя проведены опытные исследования. Выявлено, что при использовании лопастей ускорителя существующего вида невозможно получить равномерное распределение потока частиц. Поэтому в конструкцию внесены изменения в виде карманов для самофутеровки (рис. 2).

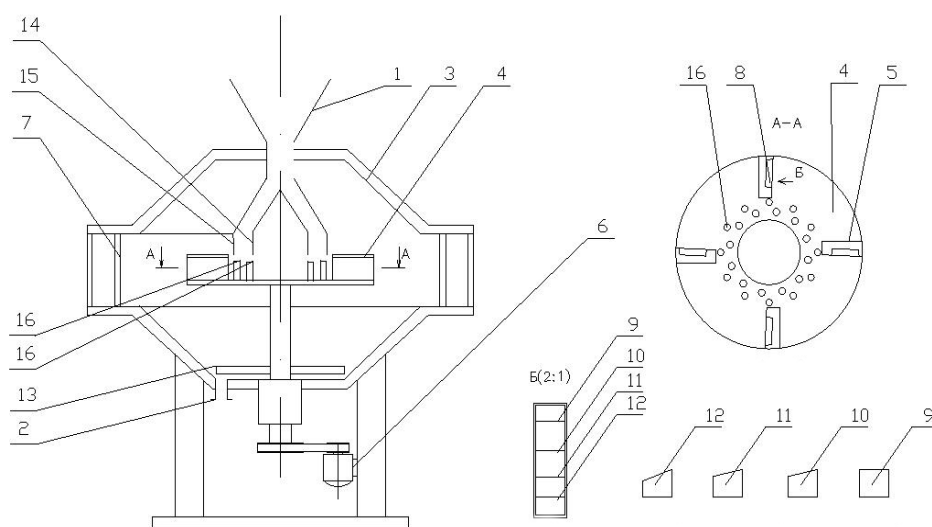
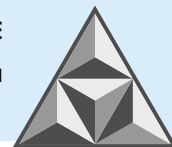


Рис. 2. Конструкция центробежно-ударного измельчителя асфальтового гранулята

Fig. 2. Centrifugal impact crusher design for asphalt granulate.



Такая конструкция центробежно-ударного аппарата включает устройства подачи частиц (поз. 1) и вывода (поз. 2) готового продукта, неподвижный цилиндро-конический корпус (поз. 3). Во внутреннем пространстве корпуса (поз. 3) (в центральной его части) установлен ускоряющий орган (поз. 4) с разгонными лопастями (поз. 5). Вращение ускоряющего органа (поз. 4) происходит от мотора (поз. 6). Отбойные элементы (поз. 7) размещены напротив ускоряющего органа (поз. 4) внутри цилиндрической части корпуса (поз. 3). С целью предотвращения износа в разгонных лопастях (поз. 5) предусмотрены самофутеровочные полости (поз. 8), в которых установлены параллельно направляющие пластины (поз. 9-12). Для выгрузки измельченных частиц в устройство вывода (поз. 3) в нижней части под ускоряющим органом (поз. 4) установлены лопасти (поз. 13). Устройство подачи (поз. 1) измельчаемого асфальтового гранулята представляет собой коаксиально размещенные пустотелые цилиндро-конические камеры (поз. 14, 15). На ускоряющем органе (поз. 4) по концентрическим окружностям установлены ударные пальцы (поз. 16) [9].

Асфальтовый гранулят в процессе помола направляется из устройства подачи через кольцевую щель между поверхностями пустотелых цилиндро-конических камер на вращающийся ускоряющий орган, в область установки ударных пальцев. При столкновении частиц гранулята с ударными пальцами происходит их первичный помол.

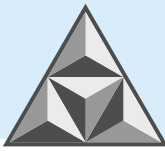
Так как устройство подачи представляет собой соосно установленные пустотелые цилиндро-конические камеры, засыпка гранулята, подвергаемого помолу, происходит не в центральную область ускоряющего органа, где наблюдается нулевая скорость, а в области с относительно высокими скоростями. В этих областях по концентрическим окружностям размещены ударные пальцы. Здесь в процессе вращения возникают скорости, обеспечивающие предварительное измельчение частиц.

После предварительного измельчения частицы захватываются разгонными лопастями, под влиянием инерционных эффектов направляются от центра ускоряющего органа к его краям и распыляются. Сформированный дисперсный поток измельчаемых частиц сталкивается с неподвижными отбойными органами. В процессе такого столкновения частиц происходит их разрушение и образование нового потока – измельченного тонкодисперсного материала, который выгружается через устройство вывода.

Для снижения износа рабочих граней разгонных лопастей в них выполнены самофутеровочные полости. В процессе измельчения эти полости заполняются движущимися частицами и формируют защитную поверхность.

Продление срока службы отбойных элементов обеспечивается режимом ударного взаимодействия, при котором набегающий факел измельчаемых частиц имеет распределение частиц по сечению, близкое к равномерному. В этом случае износ становится регулируемым, а скорость его в значительной степени падает.

Установка в самофутеровочных полостях пластин специальной формы позволяет создавать защитный слой частиц необходимой толщины. Ближе к центру ускоряющего органа верхние стороны направляющих пластин имеют наклон 20° . Это дает возможность образовать стационарный слой по отношению к рабочей части лопасти; при движении частицы поднимаются вверх. Угол наклона других направляющих пластин снижается от 10 до 5° , а периферийная пластина выполняется прямоугольной. Созданный таким ускорителем рассеянный поток характеризует практически неизменная концентрация частиц по высоте.



Для вышеописанной конструкции лопасти нами использована расчетная схема (рис. 3) и выведена дифференциальная функция распределения частиц асфальтового гранулята по углам рассеивания [10].

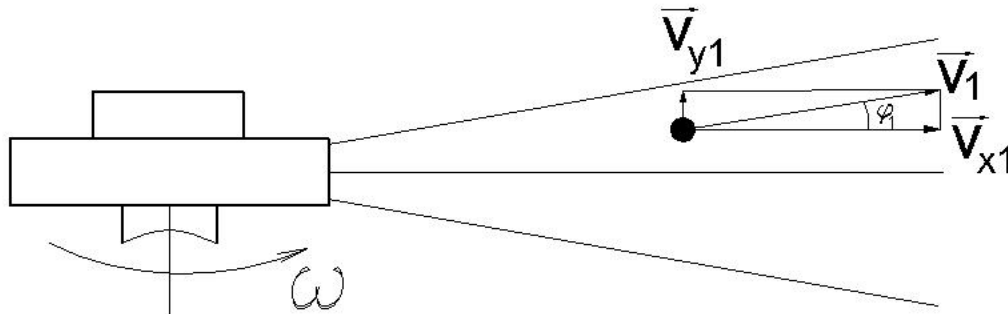


Рис. 3. Расчетная схема образования разреженного потока

Fig. 3. Calculation scheme for the formation of a rarefied flow

Наиболее часто при изучении таких процессов в химической технологии применяют методы гетерогенных сред [11] или стохастический подход [12]. В [13-15] описан экспоненциальный вид зависимости распределения числа частиц расходящегося потока:

$$dN_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{E_{01}}\right) d\Gamma_1, \quad (1)$$

где N_1 – число частиц разреженного потока;

Γ_1 – фазовый объем, при этом

$$d\Gamma_1 = dv_{x1} dv_{y1} dD_1 = dv_{x1} v_{x1} \operatorname{tg}\varphi dD_1, \quad (2)$$

где D_1 – диаметр частицы;

A_1 – константа, определяемая из условия нормировки:

$$N_1 = \int_{\Gamma_1} dN_1 = \int_{v_{x1\min}}^{v_{x1\max}} \int_{\varphi_{1\min}}^{\varphi_{1\max}} \int_{D_{1\min}}^{D_{1\max}} A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{E_{01}}\right) dD_1 d\varphi_1 dv_{x1}. \quad (3)$$

E_1 – энергия частицы, при этом

$$E_1 = \frac{mv_{x1}^2}{2} + \frac{I_z \omega^2}{2} + \frac{m(v_{x1} \operatorname{tg}\varphi_1)^2}{2}, \quad (4)$$

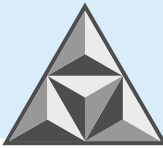
в которой

$$I_z = \frac{8}{5} m D_1^2, \quad \omega = \frac{2v_{x1}}{D_1}, \quad (5)$$

а E_{01} – параметр, определяемый из уравнения энергетического баланса, составленного для момента образования потока.

Таким образом, обобщая формулы (1) – (5), можно получить выражение, представленное в виде функции и описывающее распределение числа частиц:

$$f_1(\varphi_1) = \frac{A_1}{N_1} \int_{v_{x1\min}}^{v_{x1\max}} \int_{D_{1\min}}^{D_{1\max}} \exp\left(-\frac{E_1}{E_{01}}\right) dD_1 dv_{x1}, \quad (6)$$



Функция $f_1(\varphi_1)$ распределения числа частиц по углам рассеивания получена при взятии интеграла от выражения (6).

$$f_1(\varphi_1) = \frac{A_1 k_2}{N_1 k_1} [\operatorname{erf}(\sqrt{\pi} k_1 v_{1\min}) - \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} k_1 v_{1\max})], \quad (7)$$

где erf – функция распределения ошибок.

Коэффициенты k_1 и k_2 выражаются следующим образом:

$$k_1 = \sqrt{\frac{\rho(1+\operatorname{tg}^2 \varphi_1)}{E_{01}}}, k_2 = D_{1\min} - D_{1\max}. \quad (8)$$

Полученная зависимость (7), в силу возможности описания распределения частиц, определяет места их наибольшего скопления, что может быть использовано для расчета зоны разрушения отбойных элементов.

При создании модели ударного взаимодействия отбойного элемента и разреженного потока воспользуемся расчетной схемой (рис. 4). В присутствии случайных факторов, таких как неоднородность измельчаемого материала, отсутствие упорядоченности движения частиц, появляется необходимость использования вероятностного подхода к описанию данного процесса [16].

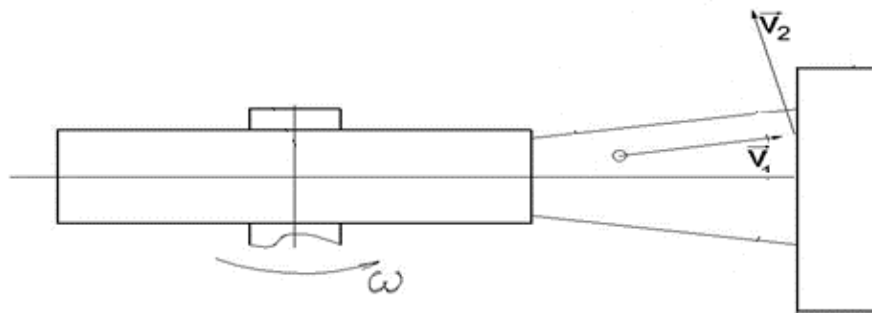


Рис. 4. Расчетная схема образования отраженного дисперсного потока

Fig. 4. Calculation scheme for the formation of a reflected dispersed flow

Распределение частиц отраженного дисперсного потока в элементе фазового объема будет иметь вид:

$$dN_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{E_{02}}\right) d\Gamma_2, \quad (9)$$

где N_2 – число частиц отраженного потока;

Γ_2 – объем, определяемый выражением:

$$d\Gamma_1 = dv_2 dD_2; \quad (10)$$

A_2 – константа, определяемая из условия нормировки;

E_{02} – параметр, определяемый из уравнения энергетического баланса в момент удара.

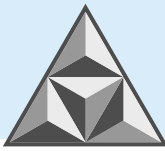
E_2 – энергия частицы, она имеет вид:

$$E_2 = \frac{mv^2}{2} + E_{\text{пов}}, \quad (11)$$

При этом для твердых частиц

$$E_{\text{пов}} = \frac{\zeta_1}{\pi D_2}, \quad (12)$$

а для неоднородных частиц асфальтобетонного гранулята справедливо иное выражение:



$$E_{\text{пов}} = \frac{\zeta_2}{\pi D_2^2} \quad (13)$$

где ζ_1, ζ_2 – коэффициенты, определяемые физико-механическими свойствами рабочего материала.

После обобщения формул (9) – (13) получаем дифференциальную функцию распределения твердых частиц отраженного потока:

$$f_2(D_2) = \frac{A_2}{N_2} \int_{v_{2\min}}^{v_{2\max}} \exp\left(-\frac{E_2}{E_{02}}\right) dv_2. \quad (14)$$

Интегрируя функцию (7), получаем распределение твердых частиц потока по их диаметрам:

$$f_2(D_2) = \frac{-A_2 \sqrt{6} [\operatorname{erf}(\theta v_{2\min}) - \operatorname{erf}(\theta v_{2\max})] \exp(\theta_1)}{N_2 D_2 \sqrt{\frac{D_2 \rho}{E_{02}}}}. \quad (15)$$

Постоянные величины находим из выражений (16) – (18):

$$\theta = D_2 \sqrt{\frac{3 D_2 \rho \pi}{E_{02}}}. \quad (16)$$

Для однородных частиц (щебень)

$$\theta_1 = -\frac{\zeta_1}{\pi E_{02} D_2}, \quad (17)$$

для неоднородных частиц (асфальтовый гранулят)

$$\theta_1 = -\frac{\zeta_2}{\pi E_{02} D_2^2}. \quad (18)$$

Средний размер образовавшихся частиц можно рассчитать [16]:

$$\langle D_2 \rangle = \frac{1}{N_2} \int_{\Gamma} D_2 dN_2 = \frac{-A_2 (D_{2\max}^2 - D_{2\min}^2) [\operatorname{erf}(\theta_2 v_{2\min}) - \operatorname{erf}(\theta_2 v_{2\max})] \exp(\theta_3)}{\sqrt{\frac{\rho}{E_{02}}}}, \quad (19)$$

где

$$\theta_2 = \sqrt{\frac{3\pi\rho}{E_{02}}}, \quad \theta_3 = -\frac{3\zeta_2}{\pi E_{02}}. \quad (20)$$

После получения отраженного потока происходит дробление частиц. Они классифицируются по диаметрам и разделяются на два вида – конечный продукт и частицы, требующие повторного дробления.

Число частиц, уносимых газовым потоком (конечный продукт):

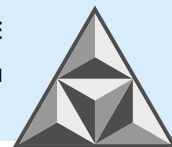
$$N_{izm} = N_2 (D_k - D_{2\min}) f_2(D_2), \quad (21)$$

где D_k – контрольное значение диаметра частиц.

Число частиц, требующих повторного помола:

$$N_{pov} = N_2 (D_{2\max} - D_k) f_2(D_2). \quad (22)$$

Полученные выражения (21) и (22) учитывают количество дорожно-строительного материала, подаваемого на дополнительное измельчение, и могут быть использованы для описания процесса дробления частиц асфальтового гранулята.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения опытных результатов и их сравнения с математической моделью нами использована конструкция центробежно-ударной мельницы, приведенная выше на рис. 2. В качестве материалов для измельчения применяли щебень, асфальтовый гранулят и асфальтобетонные смеси.

Результаты эксперимента отражены на рис. 5, 6. С целью сравнения следов движения частиц по поверхностям наклонных лопастей и отбойных элементов были использованы деревянные поверхности с нанесенным на них слоем краски. Опыты осуществлены при следующих условиях: $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 100 \text{ кг}\cdot\text{ч}^{-1}$.



Рис. 5. Следы движения частиц материала по поверхностям наклонных лопастей: $a - \beta = 90^\circ$; $b -$ криволинейная
Fig. 5. Traces of the movement of material particles on the surfaces of inclined blades: $a - \beta = 90^\circ$; $b -$ curved

Анализируя результаты износа поверхности окрасочного слоя, представленные на рис. 5, отмечаем неоднородность движения потока частиц измельчаемого материала по лопасти (рис. 5, a). Полученные данные свидетельствуют о том, что в центробежно-ударных мельницах разгонных органов с прямым углом наклона к диску практически все частицы движутся в придисковой зоне лопасти.

По этой причине на участках крепления имеет место интенсивное повреждение как диска, так и разгонной лопатки. Напротив, при движении материала по криволинейным лопастям (рис. 5, b) истирание слоя краски происходит на большей площади, но при этом наблюдается более равномерный износ.

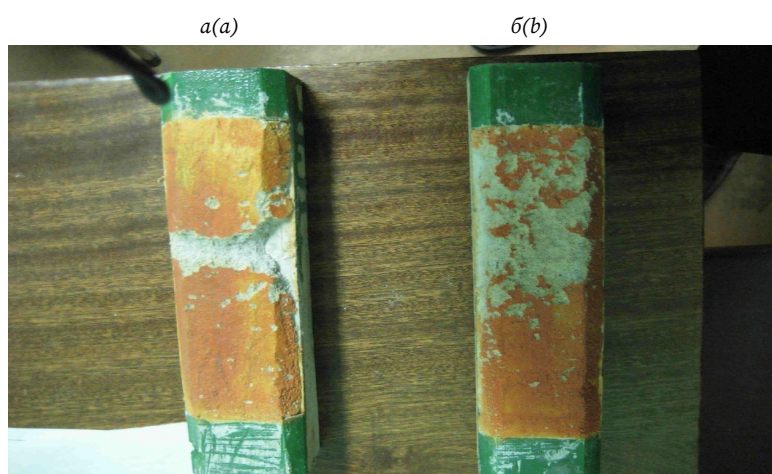
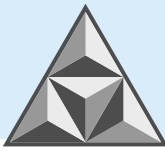


Рис. 6. Фотографии отбойных элементов в эксперименте: $a - \beta = 90^\circ$; $b -$ криволинейная
Fig. 6. Photographs of impact elements in the experiment: $a - \beta = 90^\circ$; $b -$ curved

В свою очередь, по рис. 6 видно, что в случае использования криволинейных лопастей износ распределен более равномерно (рис. 6, b), глубина повреждения становится меньше, однако площадь разрушения возрастает по сравнению с таковой для наклонных лопастей (рис. 6, a).



Адекватность математической модели проверена на промышленной центробежно-ударной мельнице «Титан» при измельчении асфальтового гранулята. Значения параметров: $E_{02} = 2.355$; $A_2 = 2.511 \cdot 10^3$ (рис. 7, а).

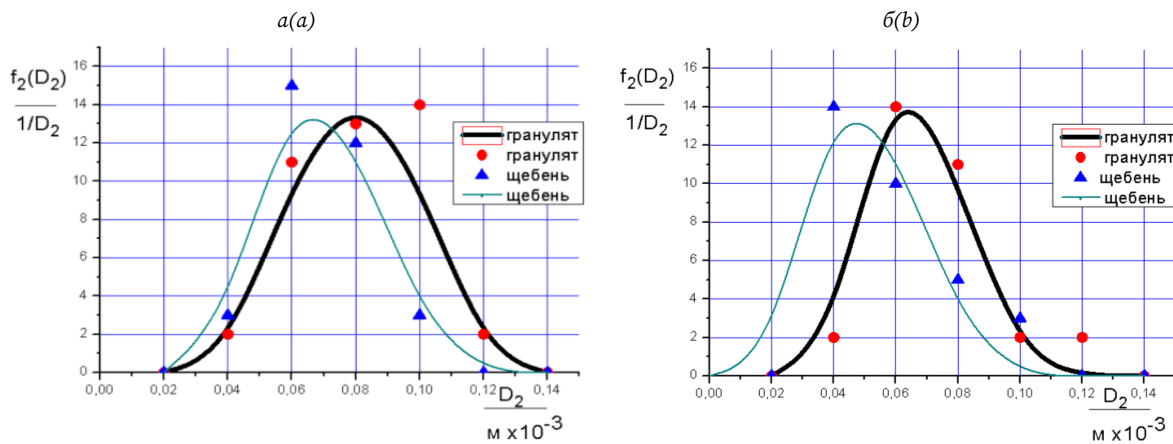


Рис. 7. Дифференциальные функции распределения числа частиц по размерам (а), в том числе – с учетом повторной переработки (б); сплошные линии – расчет, точки – опытные данные
Fig. 7. Differential particle size distribution functions (а), including – taking into account repeated processing (б); solid lines – calculation, dots – experimental data

Проведено сравнение опытных и расчетных данных для распределения числа частиц по размерам с учетом повторной переработки. Данные, полученные опытным путем, использовали для расчетов: $E_{02} = 2.411$; $A_2 = 2.437 \cdot 10^3$ (рис. 7, б).

Из рис. 7, а и б видно, что при более тонком помоле в ходе измельчении щебня расхождение теоретических и полученных опытных данных составляет $\leq 10\%$. Сравнение кривых показывает, что при повторном измельчении средний размер частиц щебня снижается на 28%, а частиц асфальтобетонной смеси – на 19%.

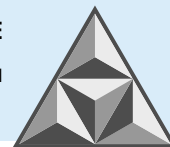
ВЫВОДЫ

Предлагается создание усовершенствованной конструкции измельчителя асфальтового гранулята, применяемого в сфере дорожного строительства. Установлено, что использование криволинейных лопастей в ускорителях приводит к снижению интенсивности износа отбойника за счет формирования равномерного потока частиц по поверхности ударного соприкосновения. Продление срока службы рабочих элементов механизма обеспечивает увеличение межремонтных периодов в работе указанного дорожно-строительного оборудования.

Теоретически обосновано получение равномерно разреженного потока частиц в измельчающем дорожно-строительном оборудовании. Вероятностный подход при математическом моделировании позволяет выявить зону, подверженную наибольшему износу, а также определить фракционный состав дорожного материала с учетом повторной его переработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Гончаров С.А., Украинский И.С.** Технологии переработки старого асфальтобетона // Дальний Восток: проблемы развития арх.-строит. комплекса. 2024. № 1. С. 76-79.



2. **Полотов К.К., Охунжонов З.Н., Косимов А.Ш.** Переработка старого асфальтобетона // *Экономика и социум*. 2022. № 4-3 (95). С. 777-782.
3. **Лупанов А. П., Басов А.Н., Кондратьева Т.Н.** Определение технологических параметров процесса измельчения асфальтового гранулята в ЭМИ // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52. № 2. С. 122-124.
4. **Шувалов С.И.** Структурная и режимная оптимизация процессов фракционирования порошков: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.17.08: Иваново, 1995. 32 с.
5. **Колобов М.Ю., Чагин О.В., Блиничев В.Н.** Повышение долговечности рабочих органов центробежно-ударных измельчителей // *Российский химический журнал*. 2019. Т. 63. № 3-4. С. 40-44.
6. **Жиров Д.К., Королева М.Р.** Математическое исследование движения сыпучих материалов в ударно-отражательном измельчителе // *Химическая физика и мезоскопия*. 2016. Т. 18. № 3. С. 361-369.
7. **Проваторова Г.В., Рябинина К.М., Вихрев А.В.** Улучшение характеристик асфальтобетонов путем их модифицирования // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 3. С. 48-61.
8. **Герасимов Д.В., Игнатьев А.А.** Опытнo-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5. Вып. 4. С. 75-89.
9. Пат. № 2653603 РФ. Центробежно-ударная мельница / А.Е. Лебедев, А.В. Дубровин, М.Е. Борисовский, Т.В. Парафина, И.С. Гуданов, С.И. Моднов; опубл. 11.05.2018.
10. **Суханов А.С., Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Лупанов А.П.** Математическое описание движения частиц в разреженном потоке центробежного измельчителя ударного действия // *Фундаментальные исследования*. М., 2012. № 3. С. 133-137.
11. **Генералов М.Б.** Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. 592 с.
12. **Зайцев В.А., Мизонов В.Е., Волынский В.Ю.** Применение теории цепей Маркова к моделированию, расчету и оптимизации процессов тепломассопереноса в промышленных аппаратах. Иваново: Изд-во Иван. гос. хим.-тех. ун-та, 2008. 268 с.
13. **Бытнев Д.О.** Основы теории и методы расчета оборудования для переработки гетерогенных систем в дисперсно-пленочном состоянии: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.04.09: Ярославль, 1995. 33 с.
14. **Van Kampen N.G.** Stochastic Processes in Physics and Chemistry. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publ. Co. 1984.
15. **Рейф Ф.** Берклевский курс физики. Статистическая физика: пер. с англ.; под ред. А.И. Шапошников, А.О. Вайсенберга. М.: Наука, 1986. Т. 5. 336 с.
16. **Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Петров А.А., Шеронина И.С., Суханов А.С.** К расчету процесса ударного взаимодействия потока твердых частиц с преградой // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2011. Т. 54. Вып. 6. С. 105-106.

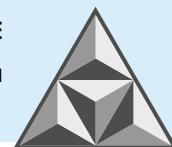
Поступила в редакцию 06.03.2026

Одобрена после рецензирования 02.04.2026

Принята к опубликованию 28.04.2026

REFERENCES

1. **Goncharov, S.A. and Ukrainskii, I.S** (2024), Technologies for processing old asphalt concrete, *The Far East: Problems of Architectural and Construction Complex Development*, no. 1, pp. 76-79 (in Russian).
2. **Polotov, K.K., Okhunzhonov, Z.N. and Kosimov, A.Sh.** (2022), Recycling of old asphalt concrete, *Economics and Society*, no. 4-3 (95), pp. 777-782 (in Russian).
3. **Lupanov, A.P., Basov, A.N. and Kondrat`eva, T.N.** (2009), Determination of technological parameters of the process of grinding asphalt granulate in EMI, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekh [ChemChemTech]*, vol. 52, no. 2, pp. 122-124 (in Russian).
4. **Shuvalov, S.I.** (1995) Structural and regime optimization of powder fractionation processes: abstract. diss. ... doc. eng. sc.: 05.17.08. Ivanovo, 32 p. (in Russian).



5. **Kolobov, M. Iu., Chagin, O.V. and Blinichev, V.N.** (2019), Increasing the durability of the working bodies of centrifugal-impact grinders, *Russian Chemical Journal*, vol. 63, no. 3-4, pp. 40-44 (in Russian).
6. **Zhirov, D.K. and Koroleva, M.R.** (2016), Mathematical study of the movement of bulk materials in an impact-reflection grinder, *Chemical Physics and Mesoscopy*, vol. 18, no. 3, pp. 361-369 (in Russian).
7. **Provatorova, G.V., Riabinina, K.M. and Vikhrev, A.V.** (2025), Improving the performance characteristics of asphalt concrete through their modification, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 3, pp. 48-61 (in Russian).
8. **Gerasimov, D.V. and Ignatyev, A.A.** (2024), Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production, *Smart Composite in Construction*, vol. 5, iss. 4, pp. 75-89 (in Russian).
9. **Lebedev, A.E., Dubrovin, A.V., Borisovskii, M.E., Parafina, T.V., Gudanov, I.S. and Modnov, S.I.** (2018), Centrifugal impact mill, IT, Patent EP 2,653,603 C1.
10. **Sukhanov, A.S., Lebedev, A.E., Zaitsev, A.I. and Lupanov, A.P.** (2012), Mathematical Description of Particle Motion in a Rarefied Flow of a Centrifugal Impact Grinder, *Fundamental Research*, Moscow, no. 3, pp. 133-137 (in Russian).
11. **Generalov, M.B.** (2002), Mechanics of solid dispersed media in chemical technology processes. Kaluga: N. Bochkareva Publishing House, 592 p. (in Russian).
12. **Zaitsev, V.A., Mizonov, V.E. and Volynskii, V.Iu.** (2008), Application of Markov chain theory to modeling, calculation, and optimization of heat and mass transfer processes in industrial apparatuses. Ivanovo: Ivanovo State Technical University, 268 p. (in Russian).
13. **Bytev, D.O.** (1995), Fundamentals of theory and methods of calculating equipment for processing heterogeneous systems in a dispersed-film state: abstr. diss. ... doc. eng. sc.: 05.04.09. Yaroslavl, 33 p. (in Russian).
14. **Van Kampen, N.G.** (1984), Stochastic Processes in Physics and Chemistry. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publ. Co.
15. **Reif, F.** (1986), Berkeley Course in Physics. Statistical Physics; translated from English; **ed. by A.I. Shaposhnikov and A.O. Vaisenberg.** Moscow: Nauka, vol. 5, 336 p. (in Russian).
16. **Lebedev, A.E., Zaitsev, A.I., Petrov, A.A., Sheronina, I.S. and Sukhanov, A.S.** (2011), Calculation of the Impact Interaction of a Stream of Particles with an Obstacle, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekh. [ChemChemTech]*, vol. 54, no. 6, pp. 105-106 (in Russian).

Received 06.03.2026

Approved 02.04.2026

Accepted 28.04.2026