

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.26-32.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.26-32.

Научная статья

УДК 621.7-4

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

### Повышение эффективности измельчения угольной массы путём изменения геометрии ударной поверхности била

Сергей Владимирович Четвериков, к.т.н.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита, Россия

Serga652008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** В молотковых мельницах разmol топлива осуществляется за счет удара бил о поступающие в мельницу куски угля, а также за счет истирающего действия бил по углю в пространстве между билами и корпусом мельницы. Недостатком молотковых мельниц является быстрый износ бил, требующий частой их замены. Известно, что чем больше масса изнашиваемого материала, тем дольше при прочих равных условиях может работать било. Увеличить массу изнашиваемого металла можно, увеличив массу самого била или степень использования металла. Как показывает практика, увеличение того и другого имеет свои пределы. Оптимальная масса била для мельниц средней производительности, имеющих диаметр до 1,6 м, равна 8...10 кг, для мельниц большой производительности, с диаметром ротора 2...2,5 м, оптимальная масса била равна 12...14 кг. Увеличение массы била сверх этих величин не приводит к существенному увеличению срока службы бил, так как при этом снижается степень использования металла. Кроме того, замена бил массой более 14 кг, значительно увеличивает трудоёмкость операций по смене бил. В работе исследована зависимость удельного износа бил от угла встречи с дробимым материалом и показана последовательность изменения формы рабочей поверхности бил. Рассмотрено истирание бил при разных углах атаки абразивных частиц угля, произведён расчёт скорости вылета частицы с рабочего органа, составлена математическая модель сил, возникающих в процессе рабочего движения бил. Разработана методика проектирования геометрической формы рабочего органа мельницы молотковой тангенциальной – била, позволяющая обеспечивать стабильный КПД мельницы за счёт равномерного износа ударной части била при сохранении её эффективной рабочей площади.

**Ключевые слова:** мельница молотковая тангенциальная, било, рабочая поверхность, угольная масса, дробление, измельчение, абразивный износ, угол атаки, кпд

**Для цитирования:** Четвериков С.В. Повышение эффективности измельчения угольной массы путём изменения геометрии ударной поверхности била // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 26–32. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

### Increasing the efficiency of coal mass grinding by changing the geometry of the impact surface of the grinding wheel

Sergey V. Chetverikov, PhD Eng.

Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, Russia

Serga652008@yandex.ru

**Abstract.** In hammer mills, fuel is ground by the impact of the beaters on the coal pieces entering the mill, as well as by the abrasive action of the beaters on the coal in the space between the beaters and the mill body. A disadvantage of hammer mills is the rapid wear of the beaters, requiring their frequent replacement. It is known that the greater the mass of the material being worn, the longer the beater can work, all other things being equal. The mass of the metal being worn can be increased by increasing the

mass of the beater itself or the degree of metal utilization. As practice shows, increasing both has its limits. The optimal mass of the beater for medium-capacity mills with a diameter of up to 1,6 m is 8...10 kg, for high-capacity mills with a rotor diameter of 2...2,5 m, the optimal mass of the beater is 12...14 kg. Increasing the mass of the beater beyond these values does not lead to a significant increase in the service life of the beaters, since this reduces the degree of metal utilization. In addition, replacing beaters weighing more than 14 kg significantly increases the labor intensity of beater replacement operations. The paper investigates the dependence of specific beater wear on the angle of impact with the crushed material and shows the sequence of changes in the shape of the working surface of the beaters. The abrasion of the beaters at different angles of attack of abrasive coal particles is considered, the particle ejection velocity from the working element is calculated, and a mathematical model of the forces arising during the working movement of the beaters is compiled. A methodology for designing the geometric shape of the working element of a tangential hammer mill – a beater – has been developed, which allows for ensuring stable mill efficiency due to uniform wear of the striking part of the beater while maintaining its effective working area.

**Keywords:** tangential hammermill, grinding wheel, working surface, coal mass, crushing, grinding, abrasive wear, angle of trim, efficiency coefficient

**For citation:** Chetverikov S.V. Increasing the efficiency of coal mass grinding by changing the geometry of the impact surface of the grinding wheel / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 26–32. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

## Введение

Технологический процесс измельчения применяется во многих отраслях народного хозяйства. Горнорудная промышленность, производство минеральных удобрений и добавок, строительная сфера ориентированы на приготовление измельчённой массы исходного материала.

Для энергетического комплекса процесс измельчения угля является ключевым звеном в подготовительной операции перед сжиганием. Детали молотковых дробилок, подвергающиеся воздействию угля как абразива, имеют износ как по массе металла, так и по форме рабочей поверхности. Одной из главных проблем измельчения угля является минимизация удельного износа бил и оптимизация затрат по их восстановлению.

### Изменение формы рабочей поверхности бил в процессе износа

Процесс изнашивания бил зависит от многих параметров, таких, как величина и форма кромок отдельных частиц, их микротвёрдость, прочность связующей основы,

процентное содержание твёрдых частиц, превышающих микротвёрдость металла рабочего органа и т. д.

В практике сопротивление металла абразивному износу характеризуется относительной износостойкостью, которая определяется из соотношения:

$$i = \frac{g_{\text{эт}}}{g_i}, \quad (1)$$

где  $g_{\text{эт}}$  – износ эталонного металла на каком-либо абразиве;  $g_i$  – износ исследуемого материала.

Анализ работ многих авторов показал, что износостойкость металлов изменяется в широких пределах в зависимости от свойств абразива, на котором она определяется [1 – 4].

Максимальные, минимальные и среднеарифметические значения относительной износостойкости бил из стали Г13Л и 40Г2, полученной на различных углях приведены в табл. 1.

## 1. Износостойкость бил из стали Г13Л и 40Г2 [5]

### 1. The wear resistance of steel grinding wheels G13L [5]

Металл	$i_{\text{max}}$	$i_{\text{min}}$	$i_{\text{cp}}$
Сталь 40Г2	1,66	1,27	1,45
Сталь Г13Л	2,69	1,64	2,10

Известно, что чем больше масса изнашиваемого материала, тем дольше при прочих равных условиях может работать било. Увеличить массу изнашиваемого металла можно, увеличив массу самого била или степень использования металла [5].

Как показывает практика, увеличение того и другого имеет свои пределы. Оптимальная масса била для мельниц средней производительности, имеющих диаметр до 1,6 м, равна 8...10 кг, для мельниц большой производительности с диаметром ротора 2...2,5 м оптимальная масса била равна 12...14 кг. Увеличение массы била сверх этих величин не приводит к существенному увеличению срока службы бил, т. к. при этом снижается степень использования металла. Кроме того, замена бил массой более 14 кг, значительно увеличивает трудоёмкость операций по смене бил.

### Недостатки стандартных бил

Предельный износ била происходит в течение 300 ч работы мельницы при нормальной загрузке углём.

Износ била мельницы начинается со свободного края, показанный на рис. 1. Это связано с тем, что максимальную скорость имеет самая удалённая от центра вращения часть била. При этом эта часть била при работе испытывает самую большую нагрузку от измельчаемого материала.

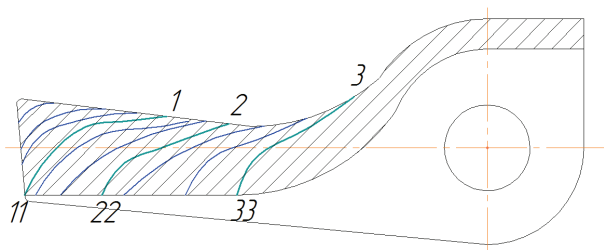


Рис. 1. Износ била при работе

Fig. 1. Wear of the beater during operation

При износе до зоны 1 – 11, било фактически сохраняет свою производительность. После зоны 1 – 11 начинается интенсивный абразивный износ. КПД мельницы начинает пропорционально уменьшаться относительно износу била в связи с тем, что: увеличивается

угол атаки частиц мелящего материала, который влияет на уменьшение силы удара размола; уменьшается рабочая площадь била, что приводит к уменьшению производительности; увеличивается «завал» мельницы, что вызывает нагрузку на электродвигатель и увеличение энергозатрат.

По истиранию била до зоны 2 – 22, составляющей 40...50 %, КПД падает до 60 %, а по истиранию до зоны 3 – 33 било становится неработоспособным.

В связи с тем, что уголь в мельницу поступает неравномерно и определёнными партиями, износ бил будет так же неравномерным и при техническом осмотре заменяются только те била, которые максимально изношены или сломаны, как показано на рис. 2.

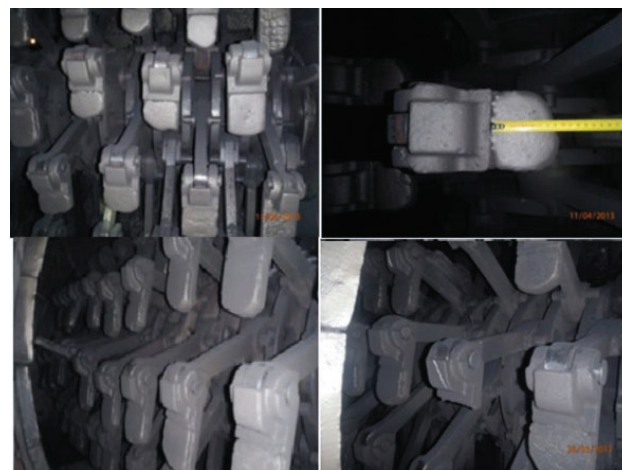


Рис. 2. Фотографии механизма ММТ и износа бил

Fig. 2. Photos of the MMT mechanism and grinding wheel wear

Самый большой износ бил происходит в мельницах на первом и последнем валу из-за того, что эти валы граничат со стенкой мельницы и поэтому там самая большая нагрузка на била.

### Истирание бил при разных углах атаки абразивных частиц угля

Сила удара абразивных частиц значительно зависит от угла наклона рабочей поверхности, при этом эта зависимость влияет как на производительность мельницы, так и на время износа поверхности.

Анализ теоретических исследований по влиянию угла атаки на производительность мельницы и скорости изнашивания поверхности бил показывает довольно сложный характер взаимодействия абразивных частиц с поверхностью молотков. На эффективность процесса измельчения оказывает влияние не только угол встречи частиц с поверхностью, но и физико-механические свойства материала, с которым частица соударяется [6].

При царапании от прочности абразивной частицы зависит исход её взаимодействия с изнашивающимся материалом: будет материал разрушен при движении частицы или сначала она разрушится сама.

При ударном действии абразивная частица любой твёрдости может вызвать прямое разрушение материала, т. к. поверхностному слою при нормальном угле атаки передаётся вся кинетическая энергия удара. От прочности частицы зависит только размер контактной площадки, к которой прикладывается ударный импульс. При неизменном исходном размере абразивной частицы всегда можно подобрать такую скорость удара, что возникшие при полном дроблении частицы напряжения в материале не превысят его прочностные возможности [7].

Любое изменение рабочей зоны бил приведёт к изменению условий дробления угля, что приведёт к изменению коэффициента полезного действия мельницы [8]. Задача исследования состоит в том, чтобы изменить форму била для повышения его долговечности при наименьшей потере КПД мельницы.

### Расчёт скорости вылета частицы

Рассмотрим процесс дробления угля и износ рабочей поверхности бил. Материал выбрасывается с ударного элемента на отбойники со скоростью  $v$ , представляющую собой геометрическую сумму двух скоростей:  $v_r = v_{отн}$ ,  $v_{r2} = v_{окр}$ , где  $v_{отн}$  — относительная скорость движения материала по поверхности ударного элемента;  $v_{окр}$  — окружная скорость движения конца ударного элемента [9].

Скорость вылета частицы находится, как геометрическая сумма окружной и относительной скоростей:

$$v = \sqrt{v_{окр}^2 + v_r^2} + 2v_{окр} v_r \sin \phi, \quad (2)$$

где  $v_r$  — относительная скорость движения частицы;  $\phi$  — угол между направлениями относительной и окружной скоростей.

Тогда угол вылета частицы с ударного элемента, повернутого относительно радиуса диска по ходу вращения, определяется из уравнения:

$$\sin \phi = \frac{v_r (\cos \phi)}{v}. \quad (3)$$

При движении частицы материала по ударному элементу увеличивается относительная скорость  $v_r$ , и, как следствие, повышается ускорение Кориолиса, которое представлено на рис. 3 в виде зависимости от положения частицы материала на плоском ударном элементе. Так же изменяется сила давления частицы на било и его износ.

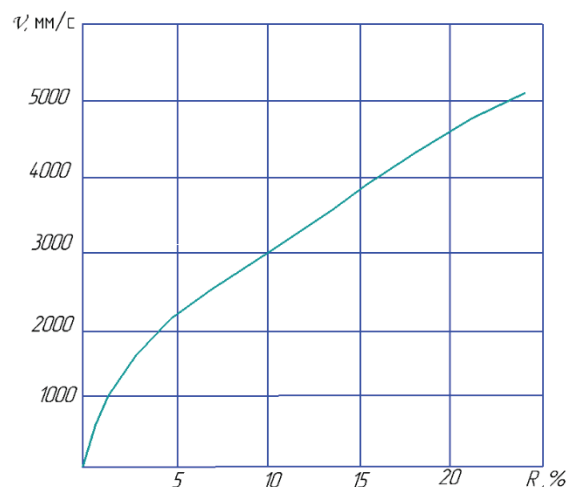


Рис. 3. Ускорение Кориолиса

Fig. 3. Coriolis acceleration

Следовательно, чем длиннее рабочая часть бил, тем больше скорость вылета материала на отбойники мельницы. Изменяя форму рабочей поверхности бил в сторону износа изменяется и процесс дробления. Для примера возьмём плоский и изогнутый ударный элемент, имитирующий износ, показанный на рис. 4.



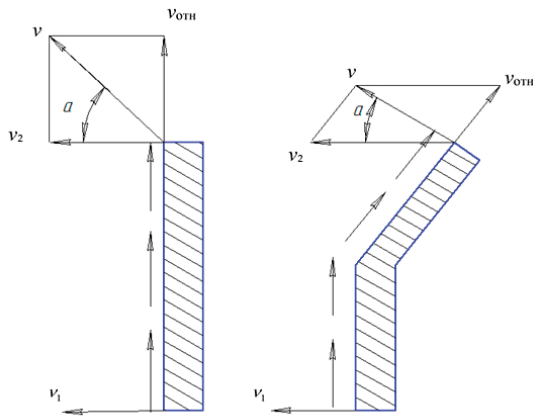


Рис. 4. Форма ударных элементов

Fig. 4. The shape of the impact elements

Представление о взаимосвязи износа ударного элемента и абсолютной скорости вылета материала представлено на рис. 4. Характерно снижение абсолютной скорости вылета материала и скорости ударного нагружения. Увеличение угла вылета частиц материала приводит к уменьшению пути движения материала от ударных элементов до отбойников.

При мелком и тонком измельчении скорость измельчаемого материала при сходе с плоского ударного элемента снижается. При фотографировании этого процесса с использованием стробоскопа наблюдается шлейф материала, отклоняющегося в сторону, противоположную движению ударных элементов.

Удельный износ, отнесённый к единице степени измельчения, для прямого и изогнутого элементов в процессе опыта практически не изменился и составил 0,268 и 0,269 г/г, а удельный расход электроэнергии, приходящейся на единицу степени измельчения, соответственно составил 1,61 и 2,47 кДж/кг.

Для сохранения стабильных характеристик дробления необходимо изменение поверхности ударных элементов по направлению вращения ротора. Это изменение позволит увеличить ресурс ударного элемента и удлинить время межремонтного цикла в период эксплуатации измельчителя.

#### Математическая модель сил, возникающих в процессе рабочего движения бил

После рассмотрения факторов, влияющих на износ и производительность мельницы молотковой тангенциальной, предлагаемая

модель била, представленная на рис. 5, получила изменение рабочей поверхности путём закругления края била в сторону, противоположную его полёту, а для предотвращения раскола и разлома детали было изменено ребро жёсткости.

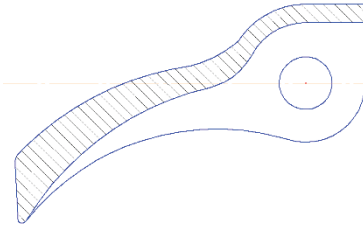


Рис. 5. Изменённая форма била

Fig. 5. The modified grinding wheel shape

При взаимодействии частицы угля с рабочей поверхностью била происходит удар – это действие силы, достигающей по модулю очень больших значений в течение весьма малого промежутка времени.

Для анализа удара частицы угля о рабочую поверхность била рассмотрен абсолютно неупругий удар. Удар – это импульс мгновенной силы, который зависит от массы тел и их скорости движения:

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2 \cdot \sin \alpha), \quad (4)$$

где  $N$  – импульс мгновенной силы;  $m_1$  – масса била;  $m_2$  – масса частицы угля;  $\alpha$  – угол падения угля на било;  $v_1$  – скорость движения била;  $v_2$  – скорость движения частицы угля.

Так как частицы угля совершают свободное падение на поверхность била, то их скорость определяется по формуле:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (5)$$

а скорость движения била определяется по формуле угловой скорости:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота падения угля;  $D$  – диаметр точки

соударения угля о било;  $n$  – число оборотов мельницы в мин.

Подставив скорости тел  $v_1$  и  $v_2$  в формулу импульса мгновенной силы, получим:

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} - \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha} \right); \quad (7)$$

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} - \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha}. \quad (8)$$

При  $N = const$ , получим:

$$\frac{D}{\sin \alpha} = \frac{1000 \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{\pi \cdot n}; \quad (9)$$

$$\sin \alpha = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}. \quad (10)$$

Результат вычислений показывает, что  $\sin \alpha$  изменяется только при изменении диаметра точки соударения частицы угля о било. Разделив рабочую поверхность била на четыре участка, показанных на рис. 6, и приняв высоту падения частицы угля  $h = 1$  м, число вращения ротора ММТ  $n = 750$  об/мин получим, что при:

$$R = 630 \text{ мм } \sin \alpha = 0,976, \quad \alpha = 98^\circ;$$

$$R = 670 \text{ мм } \sin \alpha = 0,927, \quad \alpha = 112^\circ;$$

$$R = 710 \text{ мм } \sin \alpha = 0,819, \quad \alpha = 125^\circ;$$

$$R = 750 \text{ мм } \sin \alpha = 0,669, \quad \alpha = 138^\circ.$$

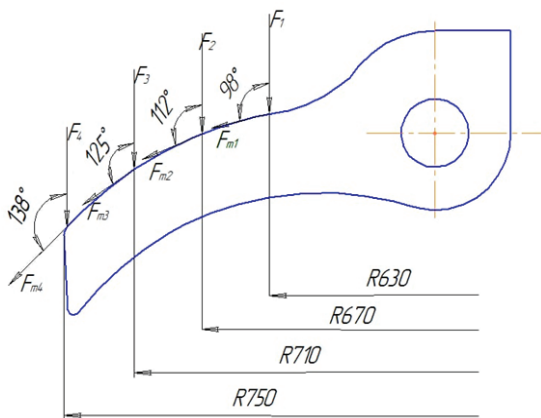


Рис. 6. Определение угла наклона разработанного била от радиуса

Fig. 6. Determination of the angle of inclination of the developed grinding wheel depending on radius

Изменённая форма била позволяет уравновесить ударные нагрузки на всей рабочей поверхности детали. Износ такого била будет более равномерен, чем у стандартного. Предполагаемые зоны износа била представлены на рис. 7.

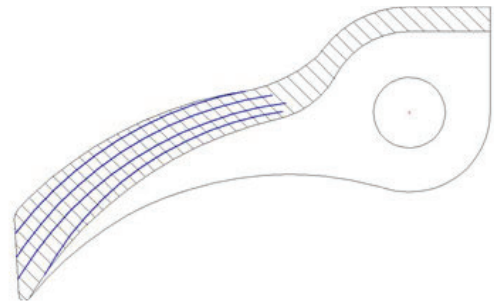


Рис. 7. Предполагаемые зоны износа разработанного била

Fig. 7. Potential wear zones of the developed grinding wheel

Использование такого била имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными билами.

Изменённый угол плоскости била снижает начальный коэффициент полезного действия мельницы. Но так как износ бил равномерен, то КПД не изменяется на всём промежутке времени работы. Сравнение со стандартным билем представлено на рис. 8, из которого видно, что полный КПД разработанного била выше, чем стандартного, как следствие, более стабильна работа всей мельницы, постоянная производительность на выходе, отсутствие «завала» мельницы, снижение расхода электроэнергии на размол угля.

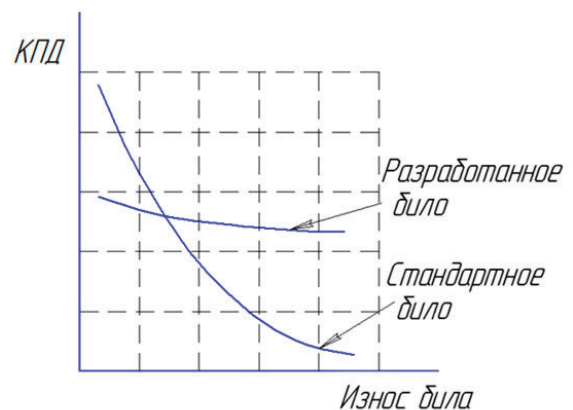


Рис. 8. Зависимость КПД от износа двух видов бил

Fig. 8. Dependence of efficiency on wear of two types of beaters

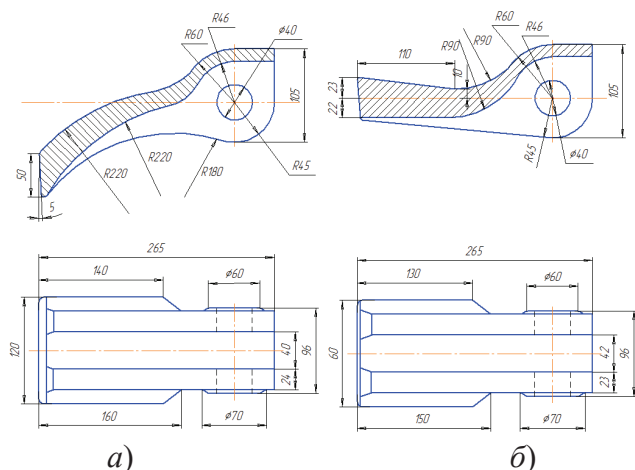


Рис. 9. Разработанное (а) и стандартное (б) било

Fig. 9. Developed (a) and standard (b) beater

### Выводы

Разработанное било имеет равномерный износ по всей рабочей поверхности, обеспечивается постоянный КПД мельницы за счёт равномерного износа ударной части, появляется возможность использования специальных накладок на рабочую поверхность, а также формирования слоёв металла на рабочей поверхности, полученных наплавкой и имеющих специальные физико-механические свойства.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тепляшин М.В. Разработка методики определения износостойкости бил углеразомольных молотковых мельниц // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2016. № 25. С. 103–106.
2. Акимов В.В., Громовик А.И., Грязнов А.Ю. Снижение абразивного износа элементов мельниц ударно-интегрального действия с применением твердых безвольфрамовых сплавов tic-tini // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 2 (54). С. 48–52.
3. Тетерин В.С., Новиков Н.Н., Гайбарян М.А., Костенко М.Ю. Теоретическое обоснование параметров и режимов работы измельчителя бурого угля // Наука в центральной России. 2019. № 3 (39). С. 60–67.
4. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Нанесение и исследование эксплуатационных характеристик упрочняющих высокоэнтропийных покрытий на билы углеразомольных мельниц // Sciences of Europe. 2020. № 47-1 (47). С. 17–26.
5. Братковский Е.В., Шаповалов А.Н., Дема Р.Р. Повышение ударно-абразивной стойкости сталей // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 64–67.

6. Балданов М.Б., Сергеев Ю.А., Лабаров Д.Б., Гармаев Ц.И. Энергетическая оценка процесса измельчения кусковых материалов // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 2 (73). С. 57–63.

7. Аэродинамика движения частиц измельчаемого материала в рабочей камере мельницы: сб. науч. тр. / БГТУ, Институт физики; под ред. А.А. Гарабажуи. Белгород, 1999. 78 с.

8. Власенко Д.А., Павлиненко О.И., Левченко Э.П. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 3 (3). С. 21–26.

9. Боброва Н.В. Влияние износа ударных элементов дробилок на их рабочие характеристики // Международная научная конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса» Иваново, 2007. С. 124–125.

### REFERENCES

1. Teplyashin M.V. Development of a methodology for determining the wear resistance of coal grinding hammer mill beaters // Bulletin of the North-Eastern State University. 2016. No. 25. P. 103–106.
2. Akimov V.V., Gromovik A.I., Gryaznov A.Yu. Reducing the abrasive wear of impact-integral mill elements using tic-tini hard tungsten-free alloys // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2017. No. 2 (54). P. 48–52.
3. Teterin V.S., Novikov N.N., Gaibaryan M.A., Kostenko M.Yu. Theoretical justification for the parameters and operating modes of a brown coal grinder // Science in Central Russia. 2019. No. 3 (39). P. 60–67.
4. Yurov V.M., Guchenko S.A., Makhanov K.M. Application and study of operational characteristics of hardening high-entropy coatings on coal mill beaters // Sciences of Europe. 2020. No. 47-1 (47). P. 17–26.
5. Bratkovsky E.V., Shapovalov A.N., Dema R.R. Increasing the impact-abrasive resistance of steels // Bulletin of Mechanical Engineering. 2019. No. 3. P. 64–67.
6. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Labarov D.B., Garmaev Ts.I. Energy assessment of the process of grinding lump materials // Bulletin of VSGUTU. 2019. No. 2 (73). P. 57–63.
7. Aerodynamics of particle motion in the mill working chamber: Coll. sci. tr. / BSTU, Institute of Physics; edited by A.A. Garabajui. Belgorod, 1999. 78 p.
8. Vlasenko D.A., Pavlinenko O.I., Levchenko E.P. Energy consumption of impact crushers with rigid and hinged attachment of beaters to the rotor // Bulletin of Donetsk National Technical University. 2016. No. 3 (3). P. 21–26.
9. Bobrova N.V. The influence of wear of impact elements of crushers on their performance characteristics // International scientific conference “Current problems and prospects for the development of the agro-industrial complex” Ivanovo, 2007. P. 124–125.

Статья поступила в редакцию 14.08.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 16.09.2024.

The article was submitted 14.08.2024; approved after reviewing 06.09.2024; assepted for publication 16.09.2024.