МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.926.9 EDN: ENKPFB

Левченко Э. П., Акимова О. И., Левченко О. А.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: edulep@rambler.ru*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ: АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа посвящена актуальной проблеме повышения эффективности приготовления стальной колотой дроби путем её раскалывания прямым стесненным ударом в оригинальной, не имеющей аналогов конструкции роторно-ударного измельчителя. Так как существующие способы получения колотой дроби в шаровых мельницах обладают очень низкой эффективностью, обосновывается энергетическая эффективность прямого стесненного удара.

Ключевые слова: *роторно-ударный измельчитель, падающие мелющие тела, энергозатраты, мощность, эффективность измельчения.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Использование стальной колотой дроби для абразивной очистки металлоизделий от коррозии, окалины, пригаров и других дефектов поверхности является общепринятой практикой [1]. В настоящее время основным оборудованием для производства такой дроби остаются шаровые мельницы, отличающиеся простотой конструкции, надежностью и безопасностью [2]. Тем не менее данная технология обладает рядом серьезных минусов: высокой металлоемкостью, интенсивным износом рабочих элементов (футеровки и мелющих тел), а также крайне низким КПД (2–20 %), что свидетельствует о неэффективном энергопотреблении [3]. Кроме того, многократное воздействие на материал в камере мельницы приводит к его переизмельчению, что ухудшает фракционный состав готового продукта и неоправданно увеличивает энергозатраты.

В контексте современных требований к эффективности производственных процессов, особую актуальность приобретает задача, заключающаяся в разработке инновационного подхода к разрушению материалов посредством прямого стесненного удара [4]. Реализация данного подхода обещает существенное повышение производительности и снижение энергозатрат, что подчеркивает его значимость как с научно-технической, так и с практической точки зрения.

Постановка задачи. В связи с высокими энергозатратами и пониженной эффективностью приготовления колотой стальной дроби посредством барабанных мельниц (мощность привода 55 кВт) повышение эффективности раскалывания округлых частиц прямым стесненным ударом обеспечивает повышение производительности и сокращение электроэнергии при выпуске готовой продукции [5, 6]. Основополагающим фактором выступает повышение разрушающего действия на измельчаемое сырье ударных элементов, обеспечивающих более концентрированную передачу разрушающих усилий по принципу «молота и наковальни». Определение энергетических характеристик не имеющего аналогов способа раскалывания и физической модели роторно-ударного измельчителя стальной дроби играет существенную роль в вопросах создания методики расчета и научном обосновании основных параметров таких машин.

Успешное решение этих задач обеспечит получение ощутимых практических результатов и модернизация технологии изготовления колотой стальной дроби.

В этой связи ***целью*** данных исследований выступает сравнительный анализ энергозатрат принципиально новой кон-

струкции роторно-ударного измельчителя на основе полученных аналитических и экспериментальных данных и сопоставимость их результатов.

Объект исследования — технологические особенности получения колотой дроби прямым ударом, включающие раскалывание частиц сферической формы в роторно-ударном измельчителе.

Предмет исследования — анализ энергетических показателей привода на основе сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Задачи исследования:

– оценка расчетной мощности электродвигателя роторно-ударного измельчителя;

– получение полиномиальной математической модели мощности привода физической модели измельчителя на основе многофакторных исследований;

– графическая визуализация полученных математических функций мощности привода и их сравнительная оценка;

– определение ошибки в расхождении теоретических и экспериментальных данных энергозатрат.

Методика исследования. Исследование энергетических параметров энергозатрат в рабочей камере роторно-ударного измельчителя прямого стесненного удара проводилось аналитическим и экспериментальным путем с последующим сопоставлением полученных энергозатрат привода.

Изложение материала. Для повышения эффективности раскалывания стальной дроби с целью получения остроугольного абразива предложен принцип стесненного прямого удара (рис. 1), реализованный в физической модели ударно-центробежной мельницы (рис. 2), принципиальная новизна и эффективность которой подтверждена патентом Российской Федерации [4]. Данный подход позволяет существенно повысить концентрацию ударных усилий за счет направленности вектора раскалывающей силы к центру сферической частицы, максимально исключив касательные напряжения, в значительной мере развивающиеся при работе шаровой мельницы, традиционно применяемой для приготовления колотой стальной дроби в производственных условиях её изготовления [7]. При этом известно, что барабанные шаровые мельницы обладают очень низким коэффициентом полезного действия, а задача его повышения выступает основной из самых актуальных при совершенствовании процессов их работы. Следовательно, интересным является рассмотрение энергозатрат ударно-центробежного измельчителя, расходуемых при раскалывании стальной дроби.

Рассмотрим задачу определения траектории движения мелющих тел с учетом сил сопротивления во вращающемся барабане шаровой мельницы (рис. 1).

Процесс измельчения начинается с подачи сырья в рабочую камеру через загрузочное отверстие. В рабочей зоне камеры измельчение материала осуществляется за счет кинетической энергии падающих мелющих тел. Процесс разрушения базируется на ударном воздействии тел о футеровку корпуса, для защиты которой применяется износостойкая сталь Гадфильда (110Г13Л). Эта сталь отличается высокой ударной износостойкостью, обусловленной упрочнением поверхности методом наклёпа.

Оптимальное разрушение материала достигается благодаря совпадению геометрических форм мелющих тел и внутренней стенки корпуса в зонах контакта [8]. При этом создаются условия для прямого стесненного удара, при котором кинетическая энергия мелющих тел максимально эффективно преобразуется в энергию разрушения. В результате удар мелющих тел по материалу происходит под прямым или близким к прямому углом.

Движение мелющих тел вверх и вниз обеспечивается вращающимся ротором, через который проходят штоки, связанные с мелющими телами. Вращение ротора преобразуется в кинетическую энергию мелющих тел, которая затем накапливает-

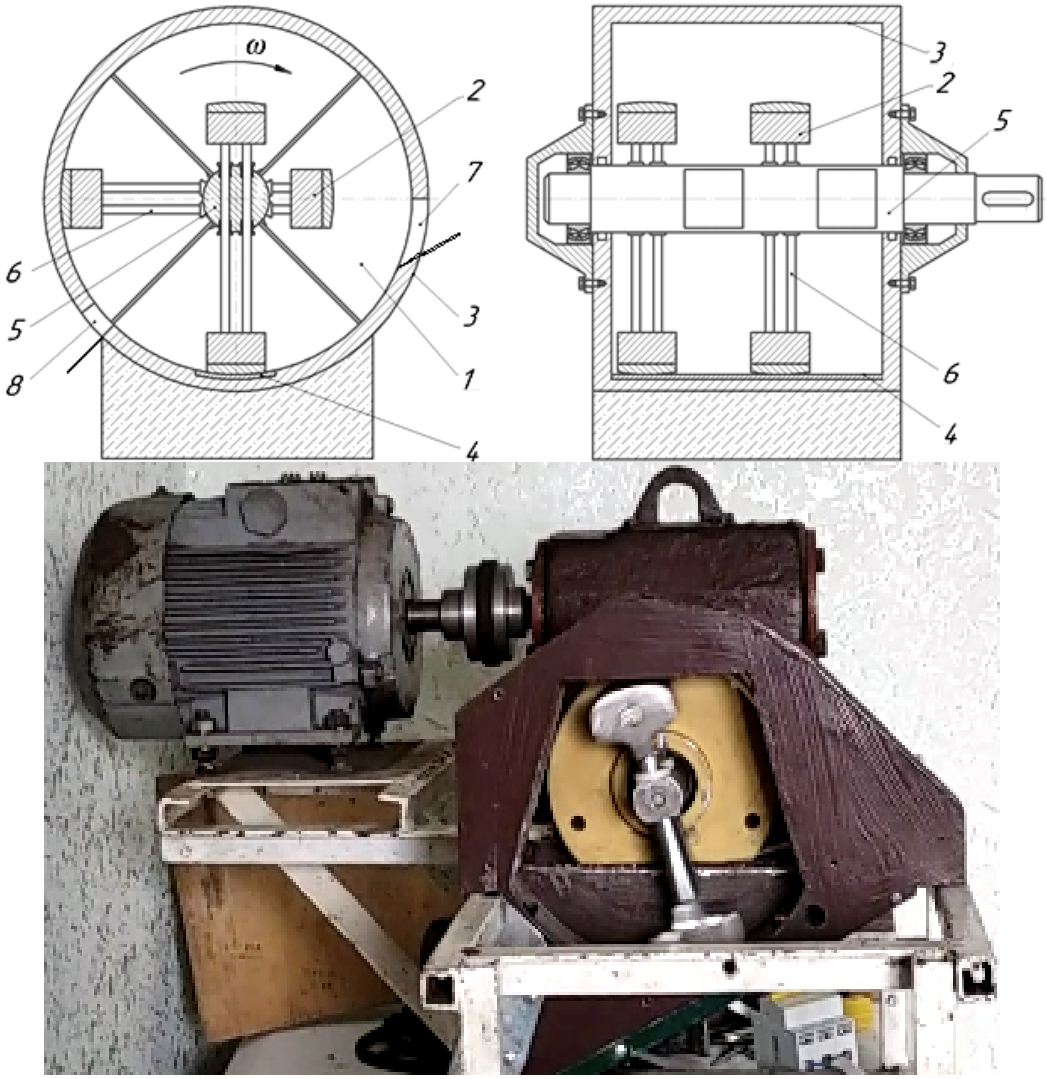
ся в виде потенциальной энергии при их подъеме. Для достижения максимальной энергии разрушения мелющие тела взаимно зафиксированы между собой и с ротором через направляющие, образуя цельную конструкцию [9]. Расколотая дробь удаляется посредством разгрузочного приспособления. Варьированием частоты вращения ротора достигается задание количества ударных циклов, что влияет на производительность процесса и размеры конечных частиц.

Мощность электропривода, задающего работу роторно-ударного измельчителя, находится с помощью приведенного ниже соотношения:

$$W_{дв} = \frac{M_{кр} \cdot \omega}{\eta_{пр}}, \qquad (1)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент; ω — угловая частота вращения ротора; $\eta_{пр}$ — коэффициент полезного действия привода [10].

На рисунке 2 показана зависимость потребляемой мощности привода роторно-ударного измельчителя от углового положения ротора в момент раскалывания стальной дроби.



1 — камера измельчения; 2 — измельчающие тела; 3 —корпус; 4 — футеровка; 5 — ротор; 6 — направляющие; 7 — загрузочное окно; 8 — разгрузочное приспособление

Рисунок 1 — Схема и конструктивные особенности измельчителя

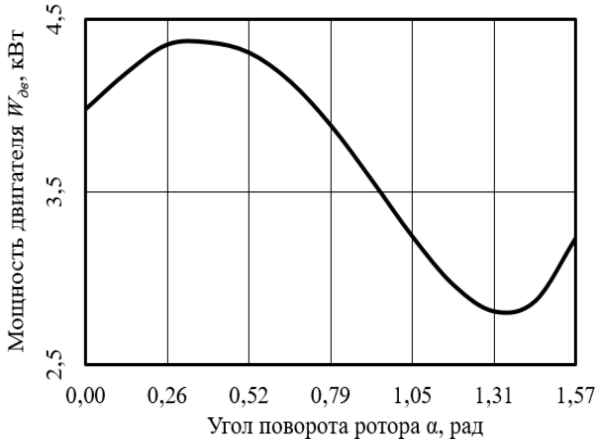


Рисунок 2 — Изменение мощности, необходимой для приведения во вращение ротора измельчителя, в зависимости от его текущего углового положения

Расчет мощности электродвигателя для роторно-ударного измельчителя производится путем умножения максимального значения мощности, определенного по графику, на коэффициент запаса. Этот коэффициент, обычно находящийся в пределах 1,1–1,3, учитывает способность двигателя справляться с перегрузками [11].

В диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от 0 до π радиан момент сопротивления и, соответственно, требуемая мощность привода могут варьироваться в 1,6 раза. Пиковое значение мощности достигается при таком угле поворота ротора, при котором начинается поступательное движение штока.

Ввиду того что расчеты выполнены для однорядной конфигурации роторно-ударного измельчителя, определение необходимой мощности осуществляется исходя из такой зависимости:

$$W_{дв} = \frac{k_{мощн} \cdot M_{кр} \cdot \omega \cdot q_p}{\eta_{пр}}, \qquad (2)$$

где q_p — показатель системности компоновки узлов измельчителя; $k_{мощн}$ — коэффициент запаса мощности.

Ориентировочная мощность электродвигателя роторно-ударного измельчителя определяется характером многорядной схемы измельчения с учетом коэффициента мощности $k_{мощн} = 1{,}5$ (согласно формуле 2 и графическим данным рис. 2), показывает, что для обеспечения процесса требуется двигатель мощностью порядка 17,2 кВт.

Экспериментальные данные, полученные в исследованиях [12, 13], касаются механизмов раскалывания стальной дроби сферической формы по выявлению мощности, затрачиваемой приводом, показали следующие эмпирические данные, представленные в таблице 1.

При этом проводился многофакторный эксперимент второго порядка на основе центрального композиционного рототабельного униформ-планирования [14] с интервалами и уровнями варьирования факторов согласно таблице 2.

Таблица 1

Результаты многофакторного эксперимента

Эксперимент	Мощность, Вт
1	125
2	135
3	175
4	180
5	130
6	155
7	100
8	185
9	140
10	145
11	135
12	140
13	145

Таблица 2

Интервалы и уровни варьирования факторов

Показатель	$x_1(m_м)$, кг	$x_{2(}\omega)$, рад/с
Основной уровень, $x_i = 0$	1,88	6,1
Интервал варьирования, I	0,18	0,98
Верхний уровень, $x_i = +1$	2,06	7,08
Нижний уровень, $x_i = -1$	1,7	5,12
Верхняя звездная точка, $x_i = +1{,}414$	2,14	7,49
Нижняя звездная точка, $x_i = -1{,}414$	1,62	4,71

Определение значимости коэффициентов регрессионной зависимости привело к формированию адекватной функции отклика, описываемой представленной полиномиальной моделью

$$y(x_1, x_2) = 4,53 \cdot x_1 + 25,13 \cdot x_2 + 0,17 \cdot x_1^2 + \\ +0,17 \cdot x_2^2 - 1,25 \cdot x_1 \cdot x_2 + 145,03. \quad (3)$$

При рассмотрении в натуральном виде [15] зависимость (3) принимает такую форму:

$$W = 48,2 \cdot m_м + 36,51 \cdot \omega + 4,97 \cdot m_б^2 + \\ +0,17 \cdot \omega^2 - 6,93 \cdot m_м \cdot \omega - 112,9. \quad (4)$$

Проверка адекватности математической модели, предназначенной для расчета мощности, требуемой на приведение в действие машины по измельчению сырья, основывалась на сравнительной оценке рассчитанных по формуле (2) значений и определенных по уравнению регрессии (4). Результаты этого сопоставления представлены в таблице 3.

Сравнение экспериментальных данных с результатами аналитических расчетов показывает, что их относительная погрешность при выявлении требуемой мощности электродвигателя составляет около 3 %.

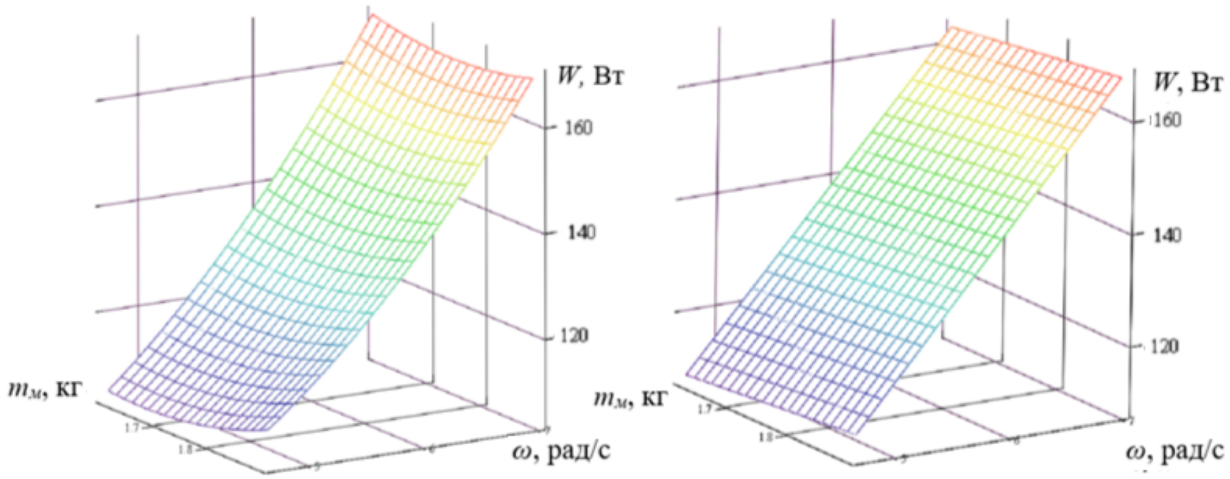
Для визуального представления и сравнения значений, рассчитанных по аналитической зависимости (2), с результатами экспериментальных исследований, полученных по эмпирической формуле (4), были построены графики. Эти графики отображают поверхности, характеризующие мощность привода ударного-роторного измельчителя, согласно теории и экспериментам (рис. 3, *а*, *б*).

Сопоставление визуальных материалов, отображенных на рисунке 3, показывает значительное соответствие расчетной модели, полученной из уравнения (2) для оценки изменения мощности привода роторно-ударной дробилки, и поверхности, сформированной на базе экспериментальных данных. Данное совпадение выступает убедительным доказательством правильности выводов, сделанных ранее в ходе аналитических работ, в том числе выражения для вычисления нужной мощности электрического двигателя при дроблении шарообразных частиц.

Таблица 3

Сравнительный анализ значений потребляемой мощности привода роторно-ударной мельницы, рассчитанных аналитическим путем и с помощью регрессионных моделей

№ п/п	Результаты		Погрешность, %
	Исходя из параметров регрессионной модели (4)	Согласно формуле (2)	
1	119,5	113,5	5,3
2	123,8	128,6	3,7
3	166,3	169,8	2,1
4	172,5	179,9	4,1
5	141,7	139,0	2,0
6	149,2	156,8	4,9
7	111,9	109,9	1,8
8	179,4	186,0	3,6
9	145,5	141,1	3,1
10	145,5	141,1	3,1
11	145,5	141,1	3,1
12	145,5	141,1	3,1
13	145,5	141,1	3,1
Усредненное отклонение, %			3,3



а — аналитические результаты; б — экспериментальные результаты

Рисунок 3 — Визуальное сравнение полученных результатов

Результаты экспериментальных работ подтвердили адекватность математической модели процесса дробления сферических частиц в роторно-ударном аппарате. Кроме того, было доказано, что предложенный подход позволяет эффективно определять оптимальные энергетические и силовые характеристики таких устройств для обработки различных типов материала, что представляет существенную практическую ценность.

Выводы и направление дальнейших исследований. На основании полученных данных были сформулированы следующие заключения:

1. В качестве метода планирования многофакторных экспериментов применено центральное композиционное рототабельное униформ-планирование второго порядка. Для изучения механизма разрушения стальной дроби и формирования рекомендаций по ключевым конструктивно-технологическим параметрам дробильно-измельчительного оборудования была создана физическая модель роторно-ударного измельчителя.

2. Обработка полученных в ходе лабораторных опытов и тестирования роторно-ударной дробилки данных базировалась на общепринятых аналитических процедурах и инструментах математической статистики. Для проверки значимости и надежности собранных результатов применялись критерии Стьюдента, Фишера и Кохрена, а также производилось вычисление относительной погрешности измерений.

3. Разрушение единичной стальной сферической дроби методом прямого стесненного удара показало, что энергетические затраты на её разрушение значительно ниже, чем при раскалывании в шаровой мельнице.

4. Моделирование измельчения дроби в роторно-ударном измельчителе на основе физической модели с использованием центрального композиционного рототабельного униформ-планирования второго порядка. Построение регрессионной модели мощности привода позволило подтвердить адекватность аналитического метода расчета мощности электродвигателя дробильного оборудования. Средний уровень относительной погрешности данного метода составляет 3,3 %.

В перспективе планируется продолжить работу над темой путем углубления теоретического анализа технико-эксплуатационных параметров роторно-ударных дробильно-измельчительных устройств. Важным шагом также станет приспособление методик и взаимосвязей, выработанных в рамках данного исследования, к обширному перечню конструкций дробильного и измельчительного оснащения, задействованного в разнообразных отраслях экономики [16].

Список источников

1. Козлов Д. Ю. Бластинг: Гид по высокоэффективной абразивоструйной обработке. Екатеринбург : Оригами, 2007. 216 с.

2. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий / П. С. Гурченко [и др.]. Минск : Беларус. навука, 2014. 113 с.

3. Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин : учебник / Э. П. Левченко [и др.]. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТИ», 2022. 316 с. EDN OUYSGK

4. Способ разрушения материалов стесненным ударом : пат. 2729155 Рос. Федерация / О. И. Павлиненко, А. П. Жильцов, В. Г. Чебан [и др.] ; № 2019127706 ; заявл. 02.09.2019 ; опубл. 04.08.2020, Бюл. 22. 6 с.

5. Акимова О. И., Левченко Э. П., Власенко Д. А. Инновационные направления в разработке и проектировании роторно-ударных измельчителей : монография. Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 120 с. EDN NYNEQK

6. Власенко Д. А., Левченко Э. П. Уточненная классификация отдельных типов дробильного оборудования предприятий черной металлургии // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2021. № 6 (48). С. 43–50. EDN ODZUSN

7. Повышение эффективности раскалывания стальной дроби в шаровой мельнице / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, О. А. Левченко, Н. А. Бондарь // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2017. № 5 (48). С. 86–91. EDN ZWJPHV

8. Павлиненко О. И., Власенко Д. А., Левченко Э. П. Аналитические приёмы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дроби стеснённым ударом // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2019. № 15 (58). С. 106–112. EDN MGHQYW

9. Левченко Э. П., Левченко О. А. Основные положения и рекомендации по изучению прикладной механики и основ конструирования (теории механизмов и машин и деталей машин) : учебное пособие. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. 188 с. EDN ZFGRSX

10. Основы проектирования и расчета механических приводов технологического оборудования : учеб. пособие / В. Т. Батиенков, Р. В. Баотенков, В. Е. Скринников, В. А. Лепихова. Новочеркасск : ЮРГПУ, 2022. 184 с. EDN ZUZXJE

11. Усольцев А. А. Электрический привод : учебное пособие. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. 238 с. EDN ZUXUSN

12. Анализ параметров процесса раскалывания стальной сферической дроби стесненным центральным ударом / А. П. Жильцов, О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Черные металлы. 2020. № 8. С. 29–33. EDN WEGZWI

13. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторно-ударного измельчителя стальной колотой дроби / А. П. Жильцов, Э. П. Левченко, О. И. Акимова, Д. А. Власенко // Черные металлы. 2024. № 1. С. 46–51. DOI: 10.17580/chm.2024.01.07 EDN FXKFUJ

14. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных исследований М. : Наука, 1965. 340 с. EDN JKADQN

15. Белай Г. Е., Дембовский В. В., Соценко О. В. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособие для вузов. М. : Металлургия, 1993. 256 с.

16. Вклад Донбасса в развитие теории и практики совершенствования процессов фракционной подготовки и дробильно-измельчительных машин / Д. А. Власенко [и др.] // Черные металлы. 2026. № 4. С. 4–11. DOI: 10.17580/chm.2026.04.01 EDN BZJZBE

© Левченко Э. П., Акимова О. И, Левченко О. А., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н., к.т.н., доц. каф. ГТ и БП ДонГТУ Смекалиным Е. С.

Статья поступила в редакцию 02.09.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Левченко Эдуард Петрович, *канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: edulep@rambler.ru

Акимова Ольга Игоревна, *канд. техн. наук, доцент каф. горных энергомеханических систем*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Левченко Оксана Александровна, *канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

***Levchenko E. P., Akimova O. I., Levchenko O. A.** *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: edulep@rambler.ru)*

ENERGY EFFICIENCY OF A ROTARY IMPACT CRUSHER: ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES

This work is devoted to the pressing issue of increasing the efficiency of steel grit production by splitting it through a direct constrained impact in a unique, one-of-a-kind rotary impact crusher design. Since the existing methods for producing grit in ball mills are highly inefficient, the energy efficiency of the direct constrained impact is justified.

Key words: *rotary impact crusher, falling grinding bodies, energy consumption, capacity, grinding efficiency.*

References

1. Kozlov D. Yu. Blasting: a guide to high-efficiency abrasive blasting [Blasting: gid po vysokoeffektivnoj abrazivostrujnoj obrabotke]. Ekaterinburg : Origami. 2007. 216 p.

2. Gurchenko P. S. [et al.]. Production of heat-treated steel cast grit in machine-building enterprises [Proizvodstvo stal'noj litoj termoobrabotannoj drobi v usloviyah mashino-stroitel'nyh predpriyatij]. Minsk : Belaruskaya Navuka. 2014. 113p.

3. Levchenko E. P. [et al.]. Design of hydraulic drives for grinding and crushing machines: a textbook [Proektirovanie gidroprivoda drobil'no-izmel'chitel'nyh mashin: uchebnik]. Alchevsk : SEI HPE LPR "DonSTI". 2022. 316 p. EDN OUYSGK

4. Method of material destruction by constrained impac t: pat. 2729155 the Russian Federation [Sposob razrusheniya materialov stesnennym udarom : pat. 2729155 the Russian Federation]. Pavlinenko O. I., Zhil'cov A. P., Cheban V. G. [et al.]. No. 2019127706 ; submitted 02.09.2019 ; published 04.08.2020. Bulletin 22. 6 p.

5. Akimova O. I., Levchenko E. P., Vlasenko D. A. Innovative directions in the development and design of rotary impact crushers : a monograph [Innovacionnye napravleniya v razrabotke i proektirovanii rotorno-udarnyh izmel'chitelej]. Vologda : Infra-Inzheneriya. 2024. 120 p. EDN NYNEQK

6. Vlasenko D. A., Levchenko E. P. Refined classification of specific types of grinding equipment used in ferrous metallurgy enterprises [Utochnennaya klassifikaciya otdel'nyh tipov drobil'nogo oborudovaniya predpriyatij chernoj metallurgii]. Bulletin of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl. 2021. No. 6 (48). Pp. 43–50 EDN ODZUSN

7. Pavlinenko O. I., Levchenko E. P., Levchenko O. A., Bondar N. A. Improving the efficiency of steel grit splitting in a ball mill [Povyshenie effektivnosti raskalyvaniya stal'noj drobi v sharovoj mel'nice]. Collection of Scientific Papers of DonSTU. 2017. No. 5 (48). Pp. 86–91. EDN ZWJPHV

8. Pavlinenko O. I., Vlasenko D.A., Levchenko E. P Analytical techniques of substantiation of the main process variables of steel grit cleaving by constrained stroke [Analiticheskie priyomy obosnovaniya osnovnyh parametrov processa raskalyvaniya stal'noj drobi stesnyonnym udarom]. Collection of Scientific Papers of DonSTU. 2019. No. 15 (58). Pp. 106–112. EDN MGHQYW

9. Levchenko E. P., Levchenko O. A. Key principles and recommendations for studying the applied mechanics and the fundamentals of design (theory of mechanisms and machines and machine parts) : a study guide [Osnovnye polozheniya i rekomendacii po izucheniyu prikladnoj mekhaniki i osnov konstruirovaniya (teorii mekhanizmov i mashin i detalej mashin) : uchebnoe posobie]. Alchevsk : SEI HPE LPR "DonSTU". 2017. 188 p. EDN ZFGRSX

10. Batienkov V. T., Baotenkov R. V., Skrinnikov V. E., Lepihova V. A. Fundamentals of design and calculation of mechanical drives for process equipment : a study guide [Osnovy proektirovaniya i rascheta mekhanicheskih privodov tekhnologicheskogo oborudovaniya : ucheb. posobie]. Novecherkassk: YURGPU. 2022. 184 p. EDN ZUZXJE

11. Usoltsev A. A. Electrical drive: study manual [Elektricheskij privod : uchebnoe posobie]. SPb. : ITMO University. 2012. 238 p. EDN ZUXUSN

12. Zhil'cov A. P., Pavlinenko O. I., Vlasenko D. A., Levchenko E. P. Analysis of process parameters for splitting steel spherical shot using a constrained central impact [Analiz parametrov processa raskalyvaniya stal'noj sfericheskoj drobi stesnennym central'nym udarom]. Chernye Metally. 2020. No. 8. Pp. 29–33. EDN WEGZWI

13. Zhil'cov A. P., Levchenko E. P., Akimova O. I., Vlasenko D. A. Justification of the structural and technological parameters of a rotary-impact crusher for split steel grits [Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskih parametrov rotorno-udarnogo izmel'chitelya stal'noj kolotoj drobi]. Chernye Metally. 2024. No. 1. Pp. 46–51. DOI: 10.17580/chm.2024.01.07 EDN FXKFUJ

14. Nalimov V. V., Chernova N. A. Statistical methods for planning extreme studies [Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nyh issledovanij]. M. : Nauka. 1965. 340 p. EDN JKADQN

15. Belaj G. E., Dembovskij V. V., Socenko O. V. Organization of metallurgical experiments: a textbook for universities [Organizaciya metallurgicheskogo eksperimenta: ucheb. posobie dlya vuzov]. M. : Metallurgiya. 1993. 256 p.

16. Vlasenko D. A. [et al.]. Donbas' contribution to the development of theory and practice in improving fractional training processes and crushing-grinding machines [Vklad Donbassa v razvitie teorii i praktiki sovershenstvovaniya processov frakcionnoj podgotovki i drobil'no-izmel'chitel'nyh mashin]. Chernye Metally. 2026. No. 4. Pp. 4–11. DOI: 10.17580/chm.2026.04.01 EDN BZJZBE

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Levchenko Eduard Petrovich, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Machine-building Engineering*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: edulep@rambler.ru

Akimova Olga Igorevna, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mining Energy-mechanical Systems*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Levchenko Oksana Aleksandrovna, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Machine-building Engineering*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia