

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ ТЕЛ ДЕФОРМАЦИЕЙ СЖАТИЯ В ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛКАХ

Власенко Д.А., Долгих В.П.

Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Ключевые слова: валковые дробилки, энергосиловые параметры, сила разрушения, мощность привода, хрупкие материалы сфероидной формы, анизотропия прочностных свойств, одноосное сжатие.

Аннотация. В работе предложены результаты исследования процесса дробления в валковых дробилках и зависимость силы, необходимой для разрушения тел сфероидной формы, обладающего анизотропией прочностных свойств, одноосным сжатием. Для верификации метода процесс разрушения хрупких сфероидных тел промоделирован конечно-элементным методом. Относительная разность результатов, полученных аналитически и с помощью программного комплекса Ansys Workbench, не превысила 13,6%. Адекватность разработанного метода подтверждена экспериментально, степень соответствия составила 69,3...95,5%. Установлено, что значения силы дробления по сравниваемым методам отличаются в 4,0 раза, а необходимая мощность привода дробилки ДЧГ 900×700 меньше в 3,2...3,7 раза, что обосновывает целесообразность снижения ее энергосиловых параметров в условиях агломерационного цеха Филиала № 1 ООО «ЮГМК».

RESEARCH OF THE PROCESS OF DESTRUCTION OF FRAGILE BODIES BY COMPRESSION DEFORMATION IN ROLL CRUSHERS

Vlasenko D.A., Dolgikh V.P.

Donbass state technical university, Alchevsk

Keywords: roller crushers, energy and power parameters, breaking force, drive power, brittle spheroid materials, anisotropy of strength properties, uniaxial compression.

Abstract. The paper proposes the results of a study of the crushing process in roller crushers and the dependence of the force required to destroy spheroid-shaped bodies with anisotropy of strength properties, uniaxial compression. To verify the method, the process of destruction of brittle spheroid bodies was simulated by the finite element method. The relative difference between the results obtained analytically and using the Ansys Workbench software package did not exceed 13, %. The adequacy of the developed method was confirmed experimentally, the degree of compliance was 69,3...95,5%. It has been established that the crushing force values for the compared methods differ by 4,0 times, and the required drive power of the crusher DCHG 900×700 is 3,2...4,7 sinter shop of Branch № 1 LLC «SMMC».

Постановка проблемы. На технико-экономические показатели дробильных машин существенное влияние оказывают их энергосиловые параметры. При их определении используется такой показатель, как сила дробления, влияющая на мощностные параметры привода дробилок [1-5].

При определении силы дробления [2, 3, 5] в валковых дробилках при разрушении материала деформацией сжатия необходимо учитывать способность тела противостоять разрушению под действием внешних сил. При этом для определения прочностных характеристик материалов используются различные методы [2, 3, 5-10]. Однако в них материалы рассматриваются как сплошная лента или тело правильной формы.

Большинство дробимых материалов имеют форму, существенно отличающуюся от вышеперечисленных [11, 12], что не позволяет определить достоверно силу дробления и мощности привода [11-14]. Большинство шихтовых материалов в условиях металлургических заводов, имеют форму близкую к сфероидной [11, 12, 14]. Ранее предлагались методы определения силовых параметров контактного взаимодействия шаровидных тел [15-19], однако все они были направлены на изучение процесса разрушения изотропных материалов.

Таким образом, исследование процесса разрушения сфероидных тел деформацией одноосного сжатия является актуальной задачей, решение которой позволит снизить энергосиловые параметры дробильных машин.

Теория вопроса. Согласно работам [12, 14] сила разрушения F_{dp} сфероидного тела при одноосном сжатии определяется из выражения:

$$\frac{3}{\pi(S_{\kappa} - S_{\delta})} \int_{-r_{\kappa}}^{r_{\kappa}} \int_{r_{\kappa} - \sqrt{r_{\kappa}^2 - x^2}}^{r_{\kappa}} \left[\frac{F_{dp} y_{\delta_0} z^2}{\sqrt{x^2 + y_{\delta_0}^2 + z^2}^5} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \frac{F_{dp} z^3}{\sqrt{(x - x_{\delta_0})^2 + z^2}^5} \right] dz dx \geq \sigma_p, \quad (1)$$

где S_{κ} – площадь «опасного» сечения ($S_{\kappa} = \pi r_{\kappa}^2$, где r_{κ} – радиус тела, м), м²; S_{δ} – площадь зоны деформации, м²; x, z – координаты элементарной площадки, м; $y_{\delta_0}, x_{\delta_0}$ – координаты сил, м; σ_p – предел прочности при растяжении, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа.

Площадь деформированной зоны куска определяется как [14]:

$$S_{\delta} = \frac{r_{\kappa}^2}{2} (\alpha_{\delta} - \sin \alpha_{\delta}), \quad (2)$$

где α_{δ} – центральный угол сектора площадки деформации куска:

$$\alpha_{\delta} = \arccos \left(\frac{r_{\kappa} - \delta_{\delta}}{r_{\kappa}} \right), \quad (3)$$

где δ_{δ} – деформация куска в направлении вектора силы [14], м.

Координаты приложения сил определяются как [14]:

$$x_{\delta_0} = y_{\delta_0} = \frac{4\sqrt{2} r_{\delta}}{3\pi}, \quad (4)$$

где r_{δ} – радиус площадки контакта [14]:

$$r_{\delta} = \sqrt{2r_{\kappa} \delta_{\delta} - \delta_{\delta}^2}. \quad (5)$$

Зависимость (1) решается с помощью численных методов [20] относительно F_{dp} .

Верификация полученных результатов. Для верификации зависимости (1) проводилось моделирование процесса разрушения тел при одноосном сжатии в программном комплексе Ansys Workbench [21].

При исследовании образцы в форме шара (рис. 1) радиусом 0,01...0,05 м и эллипсоида (рис. 2) с коэффициентом сжатия 2,0 и длиной малой полуоси 0,01...0,05 м нагружались до момента, при котором тело разрушалось, при этом фиксировались значения эквивалентных напряжений в сечении (рис. 1, б) и значение силы при образовании трещины, проходящей через всю плоскость (рис. 1, а).

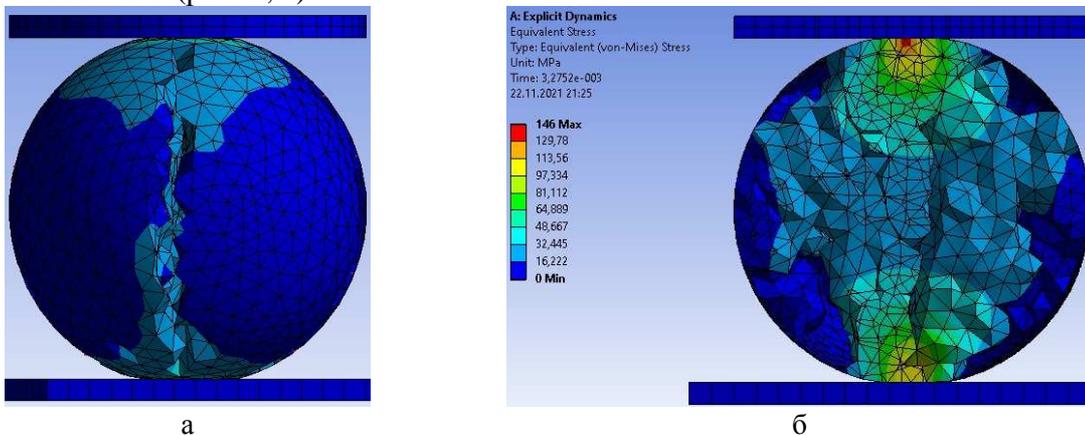


Рис. 2. Характер разрушения шара при сжатии (а) и распределение эквивалентных напряжений в «опасном» сечении (б)

У эллипсоида значения напряжений снимались в сечении его малой полуоси, где происходило разрушение (рис. 2, а).

Значения силы, необходимой для разрушения шара радиусом 0,01...0,05 м и эллипсоида с длинной малой полуоси 0,01...0,05 м, полученные с помощью аналитической зависимости (1) и разработанного конечно-элементного метода (КЭМ), представлены в таблице 1.

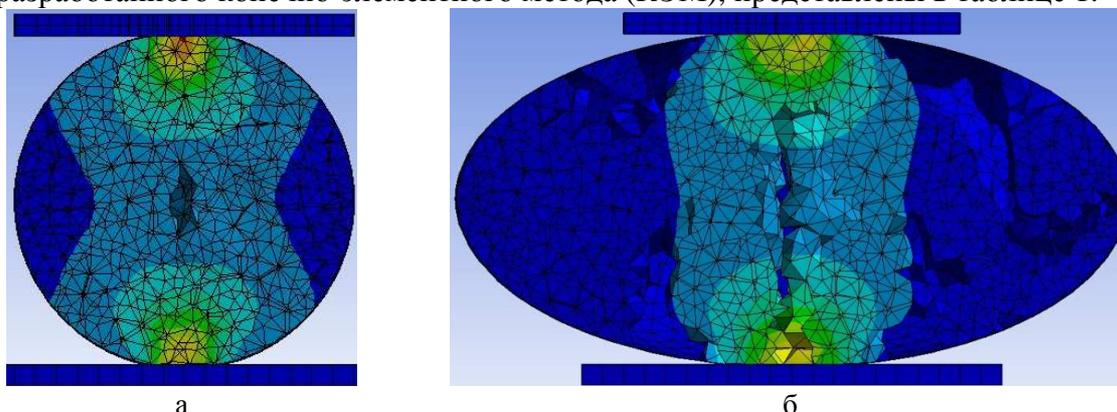


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в плоскости малой (а) и большой (б) полуоси эллипсоида при разрушении одноосным сжатием

Табл. 1. Значения разрушающей силы

Радиус, м	Значения разрушающей силы, кН		Относительная погрешность, %
	По зависимости (1)	С помощью КЭМ	
Шаровидная форма тела			
0,01	1,46	1,59	8,4
0,02	5,83	6,43	9,3
0,03	13,09	14,63	10,5
0,04	23,37	26,26	11,0
0,05	36,39	41,03	11,3
Среднее значение погрешности, %			10,1
Эллипсоидная форма тела			
0,01	1,47	1,68	12,5
0,02	5,89	6,77	13,0
0,03	13,25	15,31	13,5
0,04	23,55	27,18	13,4
0,05	36,79	42,42	13,3
Среднее значение погрешности, %			13,1

Относительная разность результатов определения силы, полученных с помощью зависимости (1) и КЭМ, не превышает 13,1%, что верифицирует зависимость (1). При этом на основании высокой сходимости (отклонение не превышает 5,5%) значений для тел в форме шара и эллипсоида для упрощения расчетов рекомендуется использовать в качестве механизма вычисления модель разрушения шарообразных тел.

Результаты экспериментальных исследований. Для подтверждения полученных результатов проведен ряд лабораторных исследований процесса разрушения различных материалов (известняк, гипс) кубической, цилиндрической и сфероидной формы. При испытании образцов использовался пресс гидравлический П-10 (рис. 3,а) с самоустанавливающейся сфероидной опорой (рис. 3,б), обеспечивающей осевое приложение предельной нагрузки 100 кН. Пресс поверялся согласно стандартным методам поверки (ГОСТ 8.136-74).

Для определения прочностных характеристик материалов применялись методы определения предела прочности при сжатии горных пород (ГОСТ 21153.2-84) и определения прочности бетонов на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжении σ_p (ГОСТ 10180-2012) (табл. 2).

Табл. 2. Пределы прочности материалов исследуемых образцов

Материал	$\sigma_{сж}$, МПа	Надежность результатов [29], %	σ_p , МПа	Надежность результатов [30], %
Гипс	15,9	99,0*	5,8	96,0*
Известняк	34,2	84,0**	4,6	96,0**
Кокс	7,2	92,0**	0,5	75,0***

* – заданное значение относительной погрешности $\varepsilon = 10\%$ при количестве испытаний $n = 10$; ** – $\varepsilon = 10\%$, $n = 7$; *** – $\varepsilon = 10\%$, $n = 5$.

Сравнительный анализ значений силы по зависимости (1) и результатов экспериментальных исследований представлены в таблице 3.

Табл.3. Результаты исследований процесса разрушения образцов сжатием

Параметр	Радиус куска, м						
	Гипс						
	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045
Разрушающая сила (по зависимости (1)), кН	5,3	9,3	14,6	21,0	28,6	37,3	47,2
Экспериментальное значение силы $F_{др}$, кН	5,5	11,0	17,1	22,2	26,8	32,9	41,7
Погрешность, %	4,5	15,1	14,7	5,2	6,6	13,6	12,1
	Известняк						
	0,014	0,017	0,018	0,02	0,022	0,023	0,025
	Разрушающая сила (по зависимости (1)), кН	4,96	7,32	8,23	10,14	12,27	13,43
Экспериментальное значение силы $F_{др}$, кН	5,9	8,2	7,5	9,0	10,0	14,9	19,0
Погрешность, %	15,9	10,7	9,7	12,8	22,7	9,9	16,6
	Кокс						
	0,015	0,016	0,018	0,021	0,022	0,022	0,024
	Разрушающая сила (по зависимости (1)), кН	0,72	0,82	1,03	1,4	1,54	1,54
Экспериментальное значение силы $F_{др}$, кН	0,55	0,7	0,86	1,1	1,35	1,2	1,41
Погрешность, %	30,7	16,6	19,5	27,3	14,3	28,6	29,8

Погрешность определения силы, необходимой для разрушения куска сфероидной формы, аналитическим способом по отношению к экспериментальным значениям для образцов, изготовленных из гипса, составляет 4,5...15,1%, известняка – 9,7...22,7%, кокса – 14,3...30,7%, что подтверждает адекватность математической модели.

Результаты исследования и их практическое применение. Практическое применение метода заключается в повышении точности определения энергосиловых параметров процесса дробления и, следовательно, мощности дробилок.

Для обоснования целесообразности применения предложенного метода представлены результаты определения силы дробления кокса сухого тушения кубической и сфероидной формы фракцией –140 мм со следующими прочностными характеристиками: предел прочности на сжатие $\sigma_p = 25$ МПа, на растяжение $\sigma_{сж} = 5$ МПа [4]).

На рисунке 3 показаны зависимости необходимой силы для разрушения кокса кубической (1) и сфероидной (2) форм от размера.

Из анализа графиков (рис. 4) видно, что значение силы для разрушения тела кубической формы в 4,0 раза больше, чем для сфероидного, что обосновывает необходимость использования в дальнейших расчетах силы дробления (согласно методу [3, 4]) коэффициента характерной формы материала k_ϕ , определяемого как:

$$k_\phi = \frac{P_k}{P_c}, \quad (6)$$

где P_k – разрушающая сила для кубического тела, Н; P_c – сила, необходимая для разрушения куска сфероидной формы, Н.

Тогда сила дробления и мощность привода дробилки определяются по методу, предложенному в работе [6], с учетом коэффициента $k_\phi = 0,25$.

На рисунке 4 представлены графики силы дробления (а), возникающей в процессе измельчения кокса сухого тушения, и необходимой мощности двигателя привода дробилки ДЧГ 900×700 (б) в зависимости от межвалкового зазора.

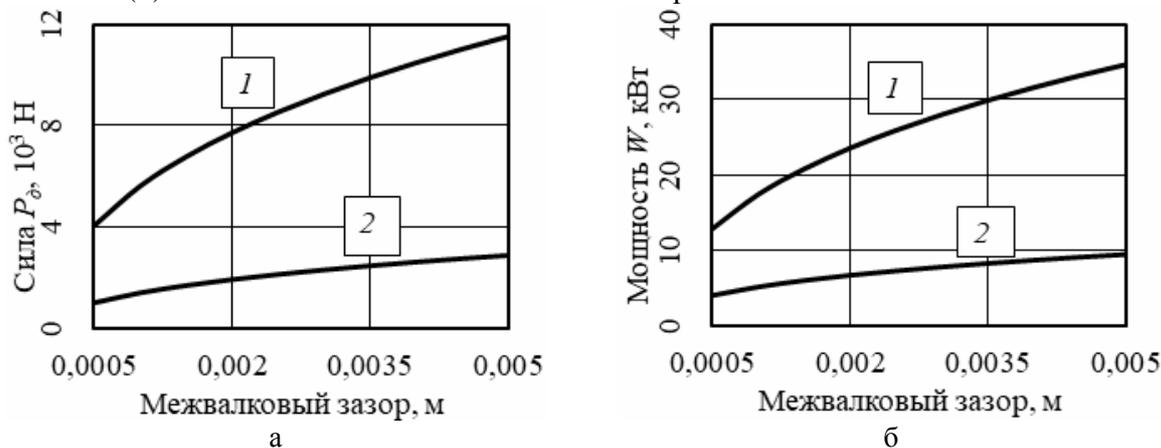


Рис. 4. Зависимости силы дробления (а) и мощности дробилки (б): 1 – по методу [1, 2]; 2 – по методу [6] с учетом коэффициента k_ϕ

На основании анализа зависимостей (рис. 5) установлено, что значения силы дробления по сравниваемым методам отличаются в 4,0 раза, а необходимая мощность привода дробилки меньше в 3,2...3,7 раза, что позволяет обосновать использование электродвигателя с меньшей номинальной мощностью (с учетом пусковых характеристик) в валковой дробилке ДЧГ 900×700 в условиях Филиала № 1 «ЮГМК».

Обсуждение и заключения

1. Рассмотрена аналитическая модель, которая описывает условия разрушения тел сфероидной формы. Предложена зависимость определения силы, необходимой для разрушения анизотропных тел сфероидной формы одноосным сжатием.

2. С помощью конечно-элементного метода верифицирована и экспериментально подтверждена адекватность аналитической модели процесса разрушения сфероидных тел, обладающих анизотропией прочностных свойств. Погрешность определения значения разрушающей силы по отношению к результатам экспериментов составила 4,5...30,7%.

3. На основании предложенного метода обосновано снижение мощности привода дробилки ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного цеха Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» в 3,2...3,7 раза.

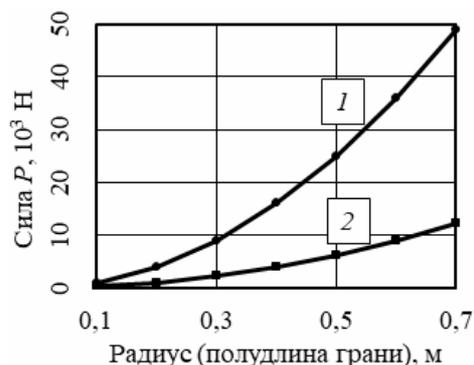


Рис. 3. Графики разрушающей силы для куска кокса кубической (1) и сфероидной (2) форм

Список литературы

1. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p. – doi.org/10.1201/9781315225524.
2. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
3. Власенко Д.А. Уточненная методика определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках // Вестник ДонНТУ. – 2020. – № 3(21). – С. 3-9.
4. Власенко Д.А. Моделирование и промышленное освоение процессов измельчения в валковых дробилках с рифлеными валками // Сталь. – 2022. – №4. – С. 21-26. – doi.org/10.3103/S0967091222040179.
5. Tesfaye O., Gemechu G., Tsega T. Design of Impact Stone crusher machine. – Lambert Academic Publishing, 2017. – 176 p.
6. Федосеев А.П. Выбор рациональных параметров ударного инструмента для дробления негабаритов: дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УГТУ, 2014. – 171 с.
7. Rashidi S.A, Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls // Powder and Particle Journal. 2017, no. 34, pp. 125-140. doi.org/10.14356/kona.2017017.
8. Beer F.P., Johnston Jr. E.R., DeWolf J.T. Mechanics of Materials. 6th ed. – McGraw-Hill, 2012. – 838 p.
9. Федотов П.К. Теория и практика дезинтеграции руды в слое частиц под давлением: дисс. ... докт. техн. наук. – Иркутск: ИГТУ, 2014. – 311 с.
10. Zhou Xiao-Ping. State-of-the-Art Review on the Progressive Failure Characteristics of Geomaterials in Peridynamic Theory // Journal of Engineering Mechanics. 2021, no. 1, p. 147. doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001876.
11. Гончаров С.А. Перемещение и складирование горной массы: учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1988. – 198 с.
12. Власенко Д.А. Теоретические аспекты моделирования и практика совершенствования молотковых дробилок с комбинированным подвесом молотков. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – 143 с.
13. Власенко Д.А. Исследование энергосиловых параметров процесса дробления в молотковых дробилках // Сталь. – 2022. – №10. – С. 35-41. – doi.org/10.3103/S0967091222100151.
14. Власенко Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валками. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. – 174 с.
15. Григорьевых Д.П., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Расчет динамического разрушения в твердых деформируемых телах // Математическое моделирование. – 2017. – №4. – С. 45-58.
16. Гурьянов Г.А., Абдеев Б.М. Прикладная модель измельчения шарообразной твердой частицы прямым ударом о недеформируемую плоскую поверхность // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 1. – С. 32-42.
17. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007 – 95 с.
18. Hertz H.R. Die Prinzipien der Mechanik. – Leipzig, J.A. Barth, 1894. – 312 p.
19. Qin R., Fang H., Liu F. Study on Physical and Contact Parameters of Limestone by DEM // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 252, p. 052110. doi.org/10.1088/1755-1315/252/5/052110.
20. Слабнов В.Д. Численные методы. – СПб.: Лань, 2022. – 392 с.
21. Xiaolin C., Yijun L. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. – Boca Raton, 2018. – 471 p.

References

1. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p. – doi.org/10.1201/9781315225524.
2. Klushantsev B.V. Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, operation features. – М.: Mechanical engineering, 1990. – 320 p.
3. Vlasenko D.A. Refined methodology for determining the energy-power parameters of the grinding process in roller crushers // News of DonNTU. 2020, no. 3, pp. 3-9.
4. Vlasenko D.A. Modeling and industrial development of grinding processes in roller mills with corrugated rolls // Steel in Translation. 2022, no. 52, pp. 445-450. doi.org/10.3103/S0967091222040179.
5. Tesfaye O., Gemechu G., Tsega T. Design of Impact Stone crusher machine. – Lambert Academic Publishing, 2017. – 176 p.
6. Fedoseev A.P. The choice of rational parameters of the percussion tool for crushing oversized: Diss. ... cand. tech. sc. – Ekaterinburg: USMU, 2014. – 171 p.
7. Rashidi S.A, Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls // Powder and Particle Journal. 2017, no. 34, pp. 125-140. doi.org/10.14356/kona.2017017.
8. Beer F.P., Johnston Jr. E.R., DeWolf J.T. Mechanics of Materials. 6th ed. – McGraw-Hill, 2012. – 838 p.
9. Fedotov P.K. Theory and practice of ore disintegration in a layer of particles under pressure: Diss. ... doct. tech. sc. – Irkutsk: ISTU, 2014. – 311 p.

10. Zhou Xiao-Ping. State-of-the-Art Review on the Progressive Failure Characteristics of Geomaterials in Peridynamic Theory // Journal of Engineering Mechanics. 2021, no. 1, p. 147. doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001876.
11. Goncharov S.A. Motion and storage of rock mass. – M.: Nedra, 1988. – 198 p.
12. Vlasenko D.A. Theoretical aspects of modeling and practice of improving hammer crushers with a combined suspension of hammers. – Kursk: Book of University, 2022. – 143 p.
13. Vlasenko D.A. Study of the Energy-Power Parameters of the Crushing Process in Hammer Crushers // Steel in Translation. 2022, no. 5, pp. 979-986. doi.org/10.3103/S0967091222100151.
14. Vlasenko D.A. Development of the theory of crushing processes and the practice of improving roll crushers with smooth and corrugated rolls. – Alchevsk: DonSTI, 2022. – 174 p.
15. Grigoriev D.P., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Calculation of dynamic destruction in solid deformable bodies // Mathematical Modeling. 2017, no. 4, pp. 45-58.
16. Guryanov G.A. Abdeev B.M. Applied model of crushing a spherical solid particle by direct impact on a non-deformable flat surface // News of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2020, no. 1, pp. 32-42.
17. Parton V.Z. Fracture mechanics: from theory to practice. – M.: Publ. house. of LKI, 2007. – 95 p.
18. Hertz H.R. Die Prinzipien der Mechanik. – Leipzig, J.A. Barth, 1894. – 312 p.
19. Qin R., Fang H., Liu F. Study on Physical and Contact Parameters of Limestone by DEM // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 252, p. 052110. doi.org/10.1088/1755-1315/252/5/052110.
20. Slabnov V.D. Numerical methods. – SPb.: Lan', 2022. – 392 p.
21. Xiaolin C., Yijun L. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. – Boca Raton, 2018. – 471 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Власенко Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии черных металлов	Vlasenko Dmitriy Alekseyevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of ferrous metallurgy
Долгих Виталий Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной энергомеханики и оборудования	Dolgikh Vitaliy Pavlovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mining energy mechanics and equipment
VlsnkDA@yandex.ru	

Получена 23.04.2023