

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ МОЛОТКОВ ПРИ СВОБОДНОМ УДАРЕ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

Власенко Д.А.
Алчевск

Ключевые слова: математическое моделирование, молотковая роторная дробилка, молоток, свободное соударение, угол отклонения, мощность привода.

Аннотация. В работе проводится исследование процесса ударного контакта молотков молотковой роторной дробилки с куском материала. Предложен уточненный расчет угла отклонения молотков при свободном соударении с дробимым материалом. Для верификации разработанной аналитической модели проведено моделирование процесса ударного контакта молотков с куском материала конечно-элементным методом. Представлены результаты сравнительного анализа значения углов отклонения, определенных с помощью аналитических зависимостей, и их соответствия с аналогичными параметрами, полученными с помощью конечно-элементного метода. Установлено, что точность определения угла отклонения с помощью разработанной зависимости выше в 1,7 раза по сравнению с ранее предложенной формулой. На основании результатов исследования обоснована целесообразность использования при определении мощности привода молотковой дробилки зависимости угла отклонения молотков с учетом момента трения, возникающего в местах контакта оси подвеса с проушиной молотка и внутренней поверхностью отверстий дисков ротора.

REFINED CALCULATION OF THE ANGLE OF DEFLECTION OF HAMMERS DURING FREE IMPACT IN A HAMMER CRUSHER

Vlasenko D.A.
Alchevsk

Keywords: mathematical modeling, hammer mill, hammer, free impact, deflection angle, drive power.

Abstract. The paper studies the process of impact contact of hammers of a rotary hammer crusher with a piece of material. A refined calculation of the hammer deflection angle during free impact with the crushed material is proposed. To verify the developed analytical model, the process of impact contact of hammers with a piece of material was simulated using the finite element method. The results of a comparative analysis of the deflection angles determined using analytical dependencies and their compliance with similar parameters obtained using the finite element method are presented. It has been established that the accuracy of determining the deflection angle using the developed dependence is 1,7 times higher than that of the previously proposed formula. Based on the research results, the expediency of using the dependence of the hammer deflection angle when determining the drive power of a hammer crusher is substantiated, taking into account the friction moment arising at the points of contact of the suspension axis with the hammer eye and the inner surface of the rotor disk holes.

Введение. Постановка проблемы

Технико-экономическая эффективность технологического оборудования в любой отрасли определяется множеством показателей, одним из которых является его энергосиловые параметры, которые, в частности для молотковых дробилок зависят от сил и общего момента сопротивления, возникающих в процессе дробления материала, и установленной мощности электродвигателя привода дробильной машины, необходимой для ее устойчивой работы.

Ранее весьма детально затрагивался вопрос исследования и определения энергосиловых показателей молотковых роторных дробилок. В данном направлении проводилось значительное количество исследований, основные положения которых представлены в научных работах [1-4]. Однако зависимости и методы расчета мощности привода дробильных машин данного типа, предложенные в них, в основном носят эмпирический характер и не учитывают основные конструктивные и технологические особенности дробилки и условия процесса дробления, реализуемого в ней.

Как показывает опыт, при определении энергосиловых параметров процессов дробления существующими способами, мощность двигателей, применяемых в приводах существующих молотковых роторных дробилок, зачастую является избыточной [5, 6]. В этом случае привод дробильной машины работает при относительно низкой загрузке (отношении мощности, потребляемой рабочим органом машины, к номинальной мощности электродвигателя) [7]. Данный режим работы не является целесообразным с точки зрения технико-экономических показателей, так как это обуславливает дополнительные капитальные вложения, увеличение массы, габаритов двигателя и самого привода [8]. При этом коэффициент загрузки электродвигателей значительно сказывается на потреблении ими реактивной мощности [8], что, в свою очередь, напрямую влияет на энергоэффективность самой дробильной машины.

В молотковой роторной дробилке при ударном контакте с материалом молотки за счет шарнирного подвеса на оси ротора отклоняются от своего радиального положения, что напрямую сказывается на моменте сопротивления, возникающего на валу ротора в процессе дробления. В свою очередь момент сопротивления влияет на расчет требуемой (установленной) мощности электродвигателя привода дробильной машины.

Исходя из вышесказанного, исследование процесса соударения и обоснование угла отклонения молотков с куском материала в процессе дробления позволит повысить точность расчета момента сопротивления на валу ротора и мощности привода молотковой дробилки, что даст возможность снизить энергопотребление процессов дробления в молотковых дробилках за счет обоснования рациональной мощности электродвигателя.

Цель и задачи работы

Целью работы является уточнение математической модели и расчета угла отклонения молотков при свободном ударном контакте с куском материала в молотковой дробилке, позволяющего повысить точность расчета необходимой мощности привода дробильной машины.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи: уточнение математической модели свободного ударного контакта молотков дробилки с куском материала; верификация уточненной зависимости угла отклонения молотка при свободном ударе конечно-элементным методом; обоснование практической целесообразности применения полученных результатов.

Теория вопроса

В работах [9, 10] отображены основные результаты исследования процесса контактного взаимодействия куска материала и рабочих органов в молотковых роторных дробильных машинах, с помощью которых определяются различные параметры свободного удара молотков по куску материала с использованием шарнирного и комбинированного способа подвеса на оси ротора. В данных исследованиях угол отклонения молотка при свободном соударении с куском материала γ_1 определяется с помощью зависимости, основанной на использовании второго закона Ньютона и статической теории удара Герца:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{R}{r - c} \right) \frac{4r_i}{(k_m + 1)\sqrt{(r - c)(R + r - c)}}, \quad (1)$$

где R – радиус окружности центров осей подвеса молотков на дисках ротора, м; r – расстояние от центра оси подвеса молотка до его внешней рабочей грани, м; c – расстояние, на которое проникает материал в рабочую зону молотков при его загрузке в рабочее пространство дробилки, м; r_i – радиус инерции молотка относительно центра оси подвеса, м; k_m – коэффициент масс молотков и материала.

Коэффициент масс молотков и материала определяется как:

$$k_m = \frac{m_{\Sigma m}}{m_y}, \quad (2)$$

где $m_{\Sigma m}$ – масса молотков, неподвижно установленных на оси подвеса, м; m_q – масса куска дробимого материала, м.

Данная зависимость точнее [5] описывает угловое положение молотка на стадии свободного соударения с куском материала при по сравнению с предложенными ранее в работах [11, 12], однако требует дополнительных уточнений.

На рисунке 1 представлена расчетная схема для разработки математической модели и обоснования уточненной зависимости угла отклонения молотка при его соударении с куском материала в рабочем пространстве молотковой дробилки.

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 1, для повышения точности расчетов при определении угла отклонения молотка при взаимном контакте с материалом необходимо учитывать момент трения, возникающий в месте контакта внутренней поверхности отверстия проушины молотка с осью подвеса или оси с внутренней поверхностью отверстий ротора.

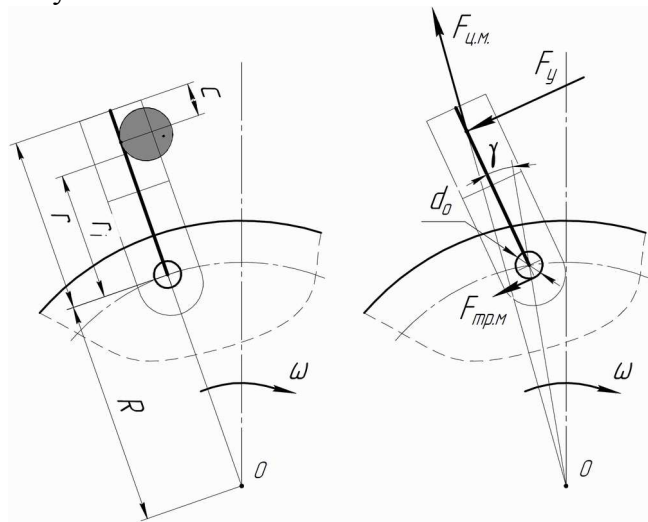


Рис. 1. Расчетная схема для определения угла отклонения молотка в момент свободного соударения с куском дробимого материала

Согласно второму закону Ньютона для вращательного движения с учетом действующих в системе сил, дифференциальное уравнение движения молотка при соударении с куском дробимого материала будет выглядеть следующим образом:

$$J_m \ddot{\gamma}_m + m_{\Sigma m} \omega^2 (R + r_i)(r - c) \sin \gamma_m + m_{\Sigma m} \omega^2 (R + r_i) \left(\frac{d_o}{2} \mu_c \right) \sin \gamma_m = 0, \quad (3)$$

где J_m – момент инерции молотка относительно оси подвеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $\ddot{\gamma}_m$ – угловое ускорение молотка относительно оси подвеса, $\text{рад}/\text{с}^2$; ω – угловая скорость ротора, $\text{рад}/\text{с}$; γ_m – угловое положение молотка в процессе ударного контакта, рад; d_o – диаметр отверстия проушины молотка, м; μ_c – коэффициент трения скольжения материала молотка по материалу оси подвеса и дисков ротора.

Решение дифференциального уравнения (3) с помощью метода, представленного в работе [5], имеет следующий вид (при начальных и граничных условиях: $t = 0$, $\gamma_2 = 0$,

$\dot{\gamma}_2 = \frac{v_{m2}}{r - c}$, где v_{m2} – скорость молотка после ударного контакта):

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{R}{r - c + \frac{d_o}{2} \mu_c} \right) \frac{4r_i}{(k_m + 1) \sqrt{\left(r - c + \frac{d_o}{2} \mu_c \right) (R + r_i)}}. \quad (4)$$

Разработка конечно-элементной модели ротора дробилки и верификация разработанных зависимостей

Для верификации полученных результатов проводилось сравнение значений угла отклонения молотка, рассчитанных с помощью зависимостей (1) и (4), со значениями, полученными при моделировании процесса ударного контакта, разработанного на основе конечно-элементного метода в программном комплексе ANSYS Workbench [13], представленного в работе [5].

Для реализации поставленной задачи построена трехмерная твердотельная модель ротора молотковой дробилки в масштабе 1:1 и шарнирно установленных на осях подвеса молотков (рис. 2).

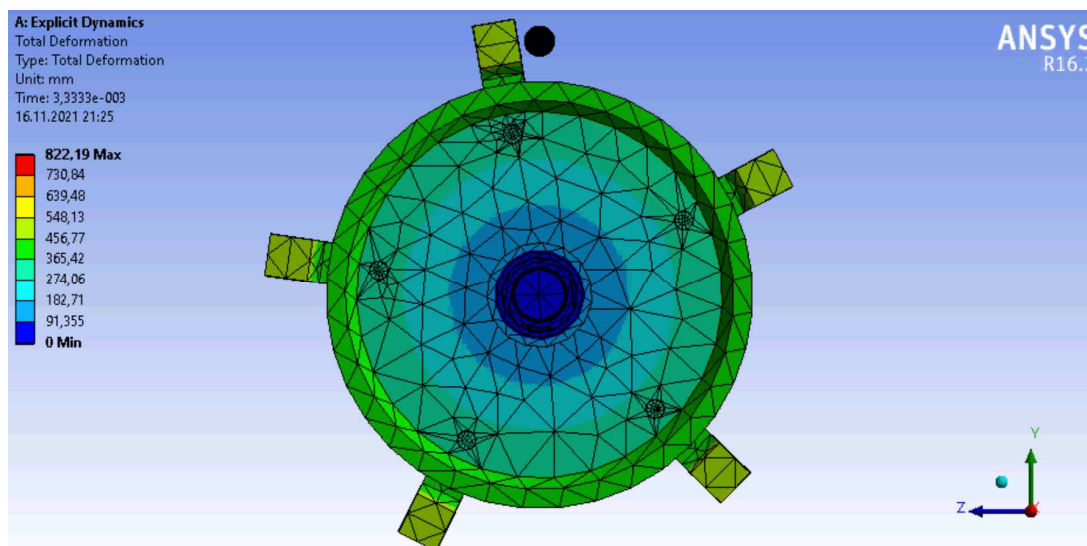


Рис. 2. Твёрдотельная модель ротора с молотками

В процессе компьютерного моделирования приняты следующие параметры системы: угловая скорость вращения ротора – $78,54 \text{ с}^{-1}$; радиус подвеса молотков – $0,43 \text{ м}$; радиус внешней грани молотка – $0,295 \text{ м}$; расстояние свободного движения куска в рабочей зоне – $0,02 \text{ м}$ [5]; масса молотка – $15,1 \text{ кг}$; радиус центра масс молотка – $0,168 \text{ м}$; диаметр дробимого куска материала – $0,04 \dots 0,08 \text{ м}$; плотность дробимого материала – 2700 кг/м^3 .

При моделировании задавалась угловая скорость вращения молотка, соответствующая угловой скорости вращения ротора, при этом кусок дробимого материала находился неподвижно в центре соударения.

Представленная конечно-элементная модель предназначена для верификации аналитической модели и оценочного определения параметров ударного взаимодействия куска материала и молотка, а также для ориентировочного определения угла отклонения молотка при взаимном контакте.

Для определения угла отклонения молотка использовались результаты линейного перемещения узловых точек на роторе и на внешней грани молотка по соответствующим радиусам (рис. 3, 4).

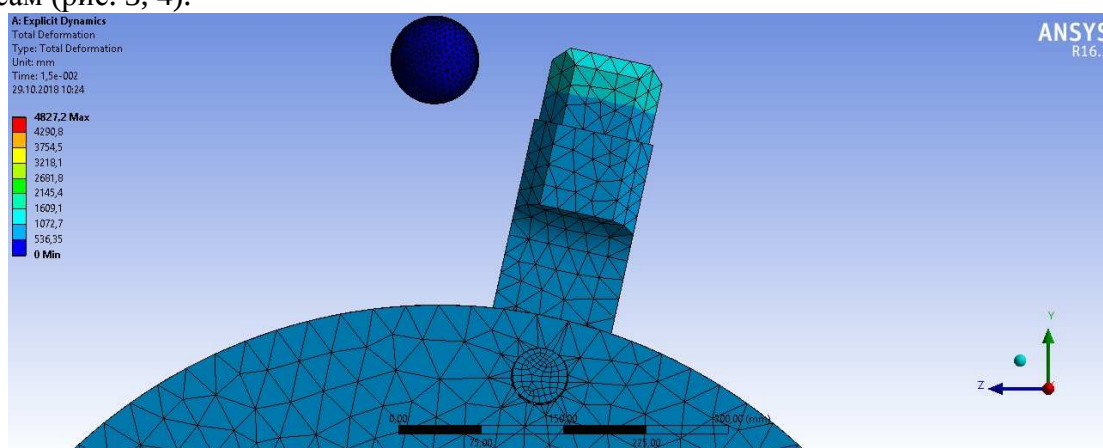


Рис. 3. Положение молотка и куска материала перед соударением

Для определения угла отклонения молотка в процессе ударного контакта с куском дробимого материала использовалась зависимость, представленная в работе [5]:

$$\gamma_s \approx \varphi_s \frac{R + r_i}{R}, \quad (5)$$

где φ_s – угол отклонения внешней грани молотка относительно оси вращения ротора, рад.

Угол отклонения внешней грани молотка относительно оси вращения ротора приближенно определяется по формуле [5]:

$$\varphi_s \approx \arcsin\left(\frac{S_{\max} - k_s S_{\min}}{R + r}\right), \quad (6)$$

где $S_{\max}$ – расстояние, пройденное внешней гранью молотка, м; k_s – отношение радиусов узловых точек на внешней грани молотка и концевом диске ротора от центра его вращения; $S_{\min}$ – расстояние, пройденное точкой на роторе, м.

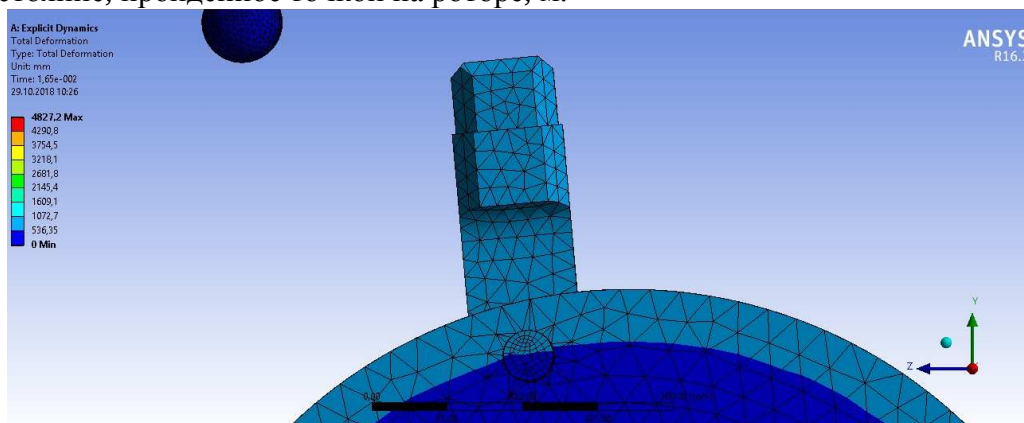


Рис. 4. Положение молотка и куска материала после соударения

Результаты исследования и практическое применение полученных результатов

По результатам проведенных исследований в таблице 1 представлены значения углов отклонения молотка при ударном контакте с куском дробимого материала различного диаметра, полученные с использованием аналитических зависимостей (1) и (4), и их соответствия (относительные погрешности) с результатами, полученными с помощью конечно-элементного метода.

Табл. 1. Значения угла отклонения молотка при свободном соударении с материалом

Показатели	Диаметр куска материала, м				
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Угол отклонения молотка по конечно-элементной модели, рад	0,037	0,06	0,099	0,151	0,212
Угол отклонения молотка по зависимости (1), рад	0,026	0,05	0,086	0,135	0,198
Относительная погрешность, %	29,7	16,7	13,1	10,6	6,6
Угол отклонения молотка по зависимости (4), рад	0,028	0,054	0,092	0,145	0,212
Относительная погрешность, %	24,3	10,0	7,1	4,0	0

Как видно из сравнительного анализа результатов (табл. 1), средняя относительная погрешность определения угла отклонения γ_1 с помощью формулы (4) составила 9,2%, при этом средняя относительная погрешность значений, полученных с помощью аналитической зависимости (1), составила 15,3%, что подтверждает повышение точности расчета угла отклонения молотков при свободном ударном контакте с куском материала в 1,7 раза.

Таким образом, предложенная аналитическая зависимость (4) позволяет повысить точность определения основных конструктивно-технологических параметров роторных дробильных машин ударного действия, в расчетах которых необходимо использовать значение угла отклонения молотка при ударном соударении с куском дробимого материала.

Обсуждение полученных результатов и заключения

1. Представлены результаты исследования процесса свободного ударного контакта молотков молотковой роторной дробилки с куском материала.

2. Уточнена зависимость для расчета угла отклонения молотков при свободном соударении с дробимым материалом за счет учета момента трения, возникающего в месте

контакта внутренней поверхности отверстия проушины молотка с осью подвеса или оси с внутренней поверхностью отверстий ротора.

3. Представлены результаты сравнительного анализа значения углов отклонения, рассчитанных с использованием аналитических зависимостей, и их соответствия с аналогичными параметрами, полученными с помощью конечно-элементного метода, верифицирующие целесообразность использования уточненной зависимости угла отклонения молотков при расчетах необходимой мощности электродвигателя привода молотковой роторной дробилки. Точность определения угла отклонения молотка при ударном контакте с материалом с помощью уточненной зависимости выше в 1,7 раза по сравнению с предложенной ранее.

5. Перспективным и необходимым направлением дальнейшего развития данных исследований является определение с помощью уточненной зависимости угла отклонения молотков при свободном контакте с материалом рациональной установленной мощности электродвигателя привода молотковой роторной дробилки ДМРиЭ 14,5×13, используемой при фракционной подготовке аглофлюса в условиях участка подготовки шихтовых материалов агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК».

Список литературы

1. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Перов В.А., Андреев С.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
3. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы: учебник для студентов / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
4. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
5. Власенко Д.А. Теоретические аспекты моделирования и практика совершенствования молотковых дробилок с комбинированным подвесом молотков. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – 142 с.
6. Vlasenko D.A. Study of the Energy-Power Parameters of the Crushing Process in Hammer Crushers // Steel in Translation. 2022, vol. 52, no. 10, pp. 979-986. doi.org/10.3103/s0967091222100151.
7. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергоэффективные электрические машины (обзор зарубежных разработок) // Электричество. – 2015. – № 4. – С. 45-47.
8. Ефременко В.М., Беляевский Р.В. О влиянии параметров асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности и потери электрической энергии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №1(83). – С. 76-79.
9. Жильцов А.П., Власенко Д.А., Левченко Э.П. Исследование и обоснование конструктивно-технологических параметров процесса измельчения агломерационных флюсов в молотковой дробилке // Черные металлы. – 2019. – №10. – С. 4-10.
10. Власенко Д.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров процесса дробления материалов в молотковых дробилках: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Алчевск, 2019. – 23 с.
11. Шестопалов А.А., Бадалов В.В. Строительные и дорожные машины и оборудование. Машины для переработки каменных материалов: учебное пособие для вузов – М.: Изд-во Юрайт, 2018. – 115 с.
12. Сидашенко А.И. Теоретическое и экспериментальное определение угла отклонения молотка в момент удара о материал // Прогрессивные технологические способы и процессы восстановления деталей сельскохозяйственной техники. – 1984. – №14. – С. 37-42.
13. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

References

1. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, operating features. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – 320 p.
2. Perov V.A., Andreev S.E., Bilenko L.F. Crushing, grinding and rumblyng minerals. – M.: Nedra, 1990. – 301 p.
3. Handbook of enrichment of ores. Preparatory processes: Textbook for students / Ed. by O.S. Bogdanov, V.A. Olevsky. – M.: Nedra, 1998. – 366 p.
4. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. Crushing, grinding and rumblyng minerals. – M.: Nedra, 1980. – 415 p.
5. Vlasenko D.A. Theoretical aspects of modeling and the practice of improving hammer crushers with a combined suspension of hammers. – Kursk: Closed Joint-Stock Company «University Book», 2023. – 142 p.

6. Vlasenko D.A. Study of the Energy-Power Parameters of the Crushing Process in Hammer Crushers // Steel in Translation. 2022, vol. 52, no. 10, pp. 979-986. doi.org/10.3103/s0967091222100151.
7. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energy efficient electric machines (review of foreign developments) // Electricity. 2015, no. 4, pp. 45-47.
8. Efremenko V.M., Belyaevsky R.V. On the influence of parameters of asynchronous engines on the consumption of reactive power and loss of electric energy // Bulletin of the Kuzbass state technical university. 2011, no. 1(83), pp. 76-79.
9. Zhiltsov A.P., Vlasenko D.A., Levchenko E.P. Research and substantiation of structural and technological parameters of the process of grinding agglomeration fluxes in a hammer mill // Chernye Metally. 2019, no. 10, pp. 4-10.
10. Vlasenko D.A. Justification of the constructive and technological parameters of the process of crushing materials in hammer crushers: Abstract of diss. ... cand. tech. sc. – Alchevsk, 2019. – 23 p.
11. Shestopalov A.A., Badalov V.V. Construction and road machines and equipment. Machines for processing stone materials: Textbook for universities – M.: Publ. house Yurait, 2018. – 115 p.
12. Sidashenko A.I. Theoretical and experimental definition of the angle of the hammer deviation at the time of the impact on the material // Progressive technological methods and processes of restoring parts of agricultural machinery. 1984, no. 14, pp. 37-42.
13. Bryayaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A. Engineering analysis in ANSYS Workbench: Textbook. – Samara: Samara state technical university, 2010. – 271 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Власенко Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, независимый исследователь	Vlasenko Dmitry Alekseevich – candidate of technical sciences, independent researcher
VlsnkDA@yandex.ru	

Получена 08.06.2025