

**Д.А. Власенко, Э.П. Левченко /к.т.н./**  
**ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)**

## **ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ СЫРЬЯ НА КИНЕМАТИКУ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И МАТЕРИАЛА В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ**

*На основании второго закона Ньютона и статической теории удара Герца разработана математическая модель движения молотка и частицы материала в процессе соударения в молотковой дробилке. В результате исследований определены зависимости угла отклонения молотка относительно радиального положения и величины сдвига при скольжении частицы по ударной поверхности в процессе дробления флюсов различного фракционного состава при подготовке шихты в условиях производства агломерата.*

**Ключевые слова:** молотковая дробилка, молоток, угол отклонения молотка, величина сдвига частицы материала по ударной поверхности.

### **Постановка проблемы**

Процессы дробления являются довольно распространенными в различных отраслях промышленности, в частности в металлургии черных металлов. На металлургических предприятиях они применяются для предварительной подготовки агломерационных флюсов и твердого топлива путем измельчения исходного сырья до необходимого фракционного состава в производстве агломерата для выплавки чугуна.

Однако эти процессы являются весьма энергоемкими и сопряжены с большой потерей металла из-за интенсивного износа молотков в процессе эксплуатации дробильных машин.

Поэтому изучение и усовершенствование данного направления с целью увеличения срока службы отдельных рабочих органов и узлов молотковых дробилок (в частности молотков), а также повышения производительности самого процесса дробления являются весьма актуальными и существенно влияют на техническо-экономические показатели процесса агломерации шихтовых материалов в металлургии.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Основным оборудованием при дроблении флюсов в агломерационном производстве являются молотковые дробилки ударного типа с горизонтальным расположением ротора [1,2]. Благодаря простоте конструкции, надежности в работе и удобству в обслуживании при эксплуатации они нашли широкое применение.

Слабым звеном в данном типе дробильных машин является рабочий узел, состоящий из вала, дисков ротора, осей подвеса и молотков [1,2].

Из опыта работы металлургических предприятий известно, что срок службы молотков в зависимости от свойств перерабатываемого материала составляет от 170 до 530 часов. Такой относительно малый срок работы приводит к повышенному расходу оборотных средств на закупку и изготовление сменных деталей и узлов, а также к увеличению времени технологических простоев за счет большого количества технических обслуживаний (ТО) на замену изношенных узлов (около 20 ТО в год) [3].

Из опыта эксплуатации молотковых дробилок в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (бывшее ПАО «Алчевский металлургический комбинат») известно, что срок службы молотков в зависимости от различных условий (используемого сырья, влажности материала, фракционного состава и т.д.) составляет от 400 до 500 часов [4]. Рабочий ресурс других элементов дробилки на несколько порядков выше. Таким образом, самым быстро изнашиваемым звеном в дробилке является молоток, в частности, его ударная поверхность, непосредственно взаимодействующая с частицами материала.

Как показывает анализ научных работ, посвященных данной теме [5,6,7], большое внимание уделяется конструктивным изменениям рабочих органов дробилок, их конструктивно-режимных параметров, прочностных характеристик и энергоемкости процессов дробления.

### **Цель (задачи) исследования**

Задачей данного исследования является определение углового положения молотков относительно своего радиального положения в ко-

нечной стадии удара по частице и величины сдвига частицы материала в результате смещения относительно ударной поверхности при взаимном контакте, а также определение их влияния на износ молотка и производительность процесса дробления флюсов в дробилке ДМРиЭ 14,5×13 [8] во время подготовки шихтовых компонентов в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» при комбинированном и обычном, шарнирном независимом способах крепления молотков на оси подвеса ротора [9,10].

### Основной материал исследования

Известен способ установки молотков ротора в молотковой дробилке, предполагающий шарнирную установку молотков на оси подвеса, который реализован в молотковой дробилке [1,2].

Основным недостатком этого способа являются лишние затраты энергии при дроблении вследствие большого отклонения молотков от их радиального положения при ударе [11].

Предлагаемый комбинированный способ реализуется в следующем: все молотки устанавливаются на оси подвеса жестко, как показано на рис. 1 (за счет некруглой формы отверстия молотка и оси), в то же время ось в отверстиях ротора не фиксируется.

Для сравнительного анализа эффективности применения комбинированного и шарнирного способов крепления в молотковой дробилке используем математическую модель, основанную на использовании второго закона Ньютона (дифференциального закона механического движения) и статической теории удара Герца.

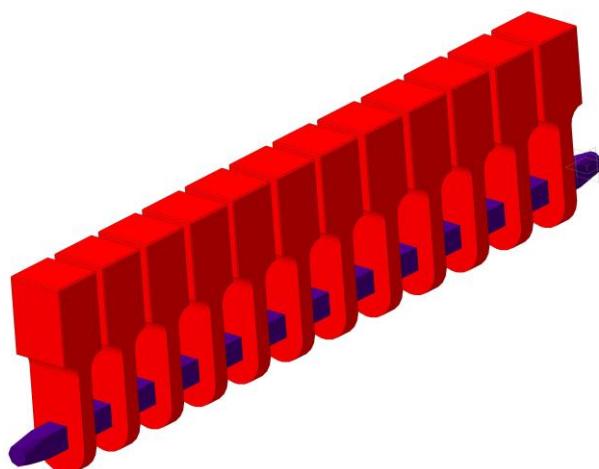


Рис. 1. Схема установки молотков при комбинированном способе крепления на оси подвеса

Классическая теория удара упругих тел вытекает непосредственно из его статической теории контакта. То есть относительная скорость тел при соударении равна нулю, и центр соударения (точка G) остается неподвижным [12,13] (рис. 2). В случае применения данной теории в условиях молотковой дробилки используется система, состоящая из двух взаимосвязанных шарниров, врачающихся относительно центров вращения ротора (рабочая зона молотков с радиусом вращения –  $R'$ ) и оси подвеса молотков (радиус подвеса –  $R$ ), где положение точки соударения в координатных осях  $x$  и  $y$  остается неизменным.

Учитывая эти закономерности, предположим, что в процессе соударения происходит

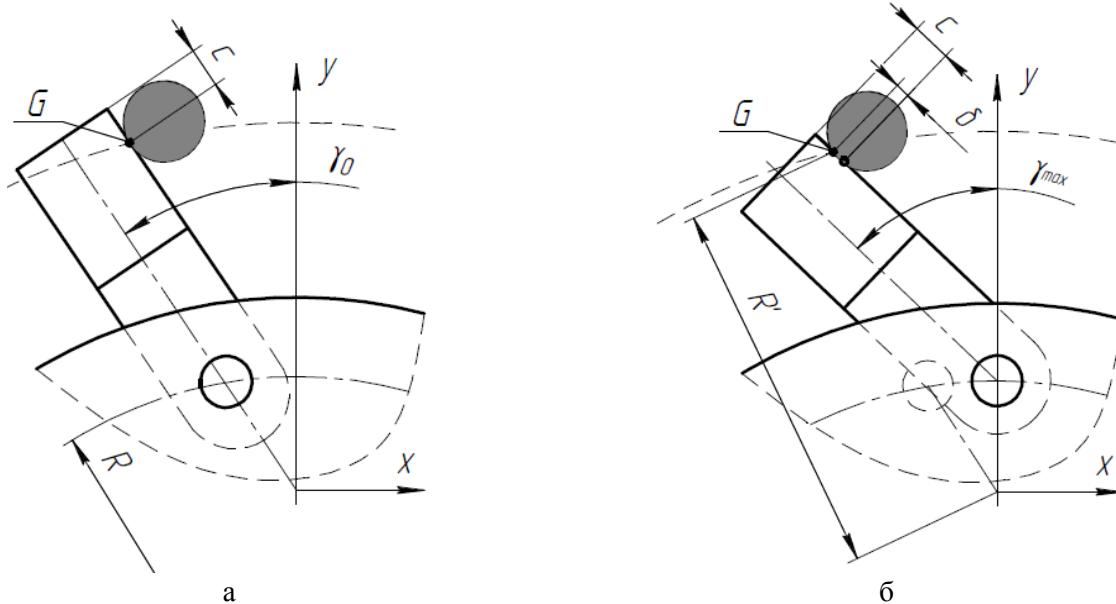


Рис. 2. Схематическая модель ударного контакта частицы материала и молотка:  
а – в начальной стадии удара; б – в конечной стадии удара

отклонение молотка от его радиального положения на угол  $\gamma$  и смещение точки контакта частицы по ударной поверхности на расстояние  $\delta$  за счет вращательного движения системы.

Для определения угла отклонения молотков необходимо исследовать процесс одиночных ударов молотков дробилки в момент контакта ударной поверхности с частицей материала.

Рассмотрим обратную задачу – частица материала с определенной скоростью ударяет по неподвижному молотку. В момент удара молоток получает начальную скорость, зависящую от массы частицы материала, скорости ее движения и момента инерции молотка. Предположим, что происходит абсолютно неупругий, центральный удар. Расчетная схема имеет вид, представленный на рис. 2.

Представим частицу материала в виде условно сосредоточенной массы  $m_2$ , а молоток в виде условного стержня массой  $m_1$ , в этом случае переносим центр соударения в условную точку А на оси молотка (рис. 3).

Для определения начальной скорости, приобретаемой точкой А после удара об молоток частицы материала, движущейся со скоростью  $v_2$ , можно воспользоваться законом сохранения кинетической энергии и законом сохранения импульса тел, вступающих во взаимодействие [14]. Исходя из этого, формула для определения скорости движения молотка в конечной стадии

соударения (когда центры масс удаляются друг от друга) выглядит как:

$$v'_1 = v_2 \frac{2m_2}{nm_1 + m_2}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество неподвижно установленных молотков в ряду на оси подвеса. В этом случае на материал воздействует суммарная сила удара всех молотков в ряду, следовательно, необходимо учитывать массу всего ряда молотков.

После определения начальной скорости и окончания фазы соударения молоток отклоняется на угол  $\gamma$ , который может быть определен исходя из дифференциального уравнения движения после завершения удара:

$$J_m \ddot{\gamma} + m_1 \omega^2 R'(r - c) \sin \gamma = 0, \quad (2)$$

где  $J_m$  – момент инерции молотка;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $r$  – расстояние от оси подвеса до внешней грани ударной части молотка;  $c$  – расстояние (глубина) внедрения измельчаемой частицы в рабочую зону ротора [15].

Поскольку угол  $\gamma$  предполагается достаточно малым, то можно принять, что  $\sin \gamma = \gamma$ ,  $R' = R + r - c$  [16]. В этом случае общее решение дифференциального уравнения можно записать как:

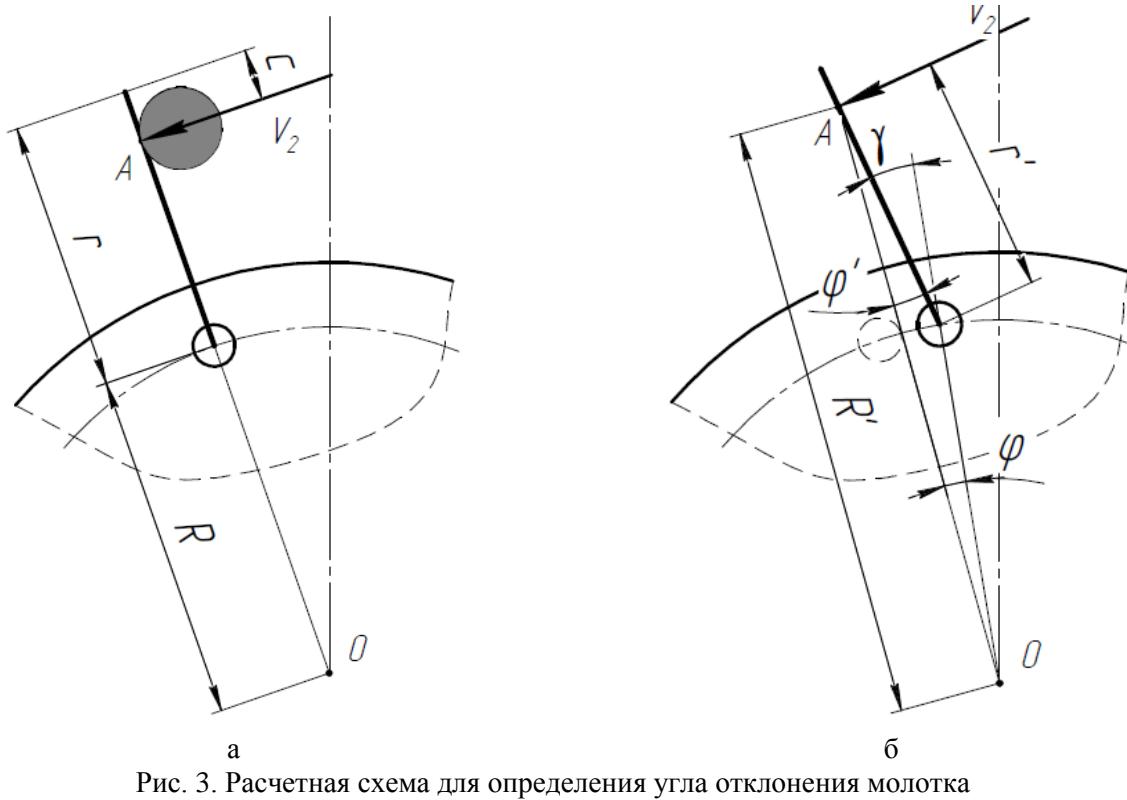


Рис. 3. Расчетная схема для определения угла отклонения молотка в момент соударения с частицей материала:  
а – в начальной стадии удара; б – в конечной стадии удара

$$\gamma = C_1 \sin \sqrt{\omega_1} t + C_2 \cos \sqrt{\omega_1} t, \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования;

$$\omega_1 = \frac{\omega^2(R+r-c)(r-c)}{r_u^2}.$$

С использованием начальных значений:  $t=0$ ,  $\gamma=0$ ,  $\dot{\gamma}=\frac{v'_1}{r-c}$  формула (3) приобретает вид:

$$\gamma = \frac{v'_1}{(r-c)\sqrt{\omega_1}} (\sin \omega_1 t). \quad (4)$$

Учитывая, что максимальное значение  $\sin \gamma$  принимает при  $\omega_1 t = \frac{\pi}{2}$ , и подставив значение  $v'_2$ , получаем формулу для определения угла отклонения молотка при соударении с частицей материала:

$$\gamma_{\max} = \left(1 + \frac{R}{r-c}\right) \frac{2m_2}{(nm_1 + m_2) \sqrt{\frac{(r-c)(R+r-c)}{r_u^2}}}, \quad (5)$$

где  $r_u$  – радиус инерции молотка относительно оси подвеса.

Для наглядного сравнения значений угла отклонения при комбинированной и шарнирной подвеске молотков приведены графические зависимости угла отклонения молотка от массы кусков известняка и способа установки бил (рис. 4).

При ударе происходит сдвиг частицы материала вдоль поверхности скольжения. Из треугольника, образованного сторонами  $R'$ ,  $R$ ,  $r'$  (см. рис. 2б), с учетом того, что точка контакта остается неподвижной, находим расстояние, на которое смещается частица по бойку в процессе ударного контакта, которое определяется по следующей формуле:

$$\delta = (R^2 \cos 2\gamma + R'^2 - R(R^2(\cos^2 2\gamma - 1) + 4R'^2 \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} - r - c. \quad (6)$$

Показатели смещения дробимого материала по рабочей поверхности бойка в зависимости от угла отклонения молотка в процессе ударного контакта в первой стадии дробления отображены на графике (рис. 5).

Проанализировав полученные результаты, можно предположить, что при увеличении угла наклона молотка в направлении противоположном вращению ротора резко возрастет величина сдвига частицы по его рабочей части и в связи с

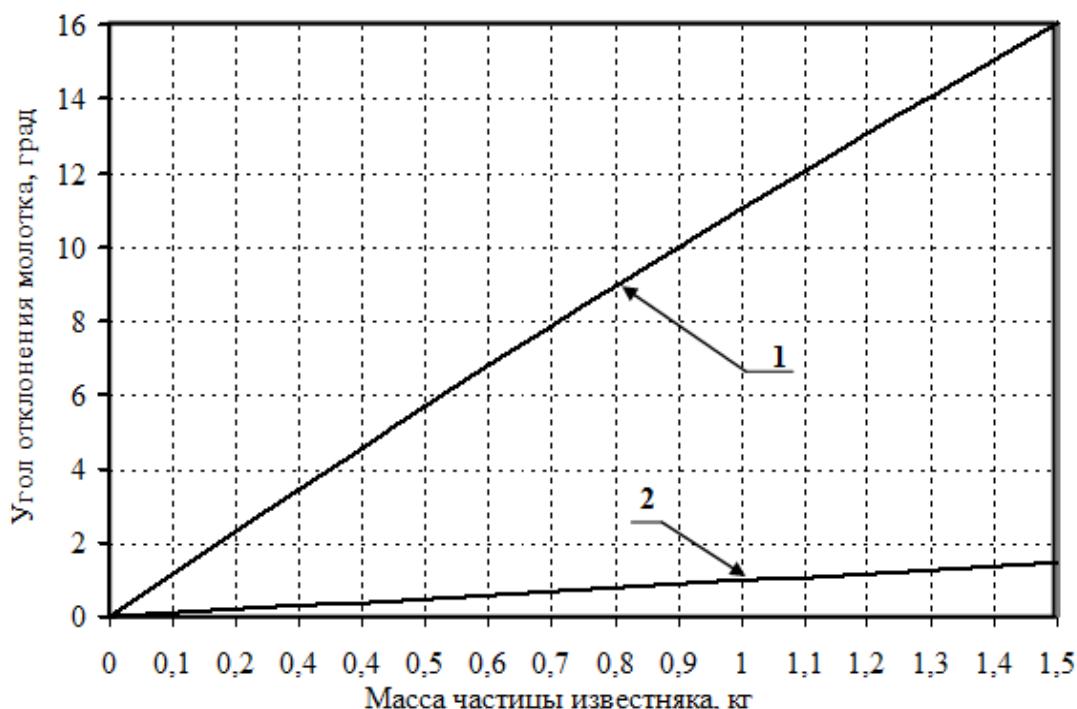


Рис. 4. Графики зависимости угла отклонения молотков с комбинированным и шарнирным способами установки на оси подвеса при соударении с частицей флюса различной массы:  
1 – обычный шарнирный способ; 2 – комбинированный способ

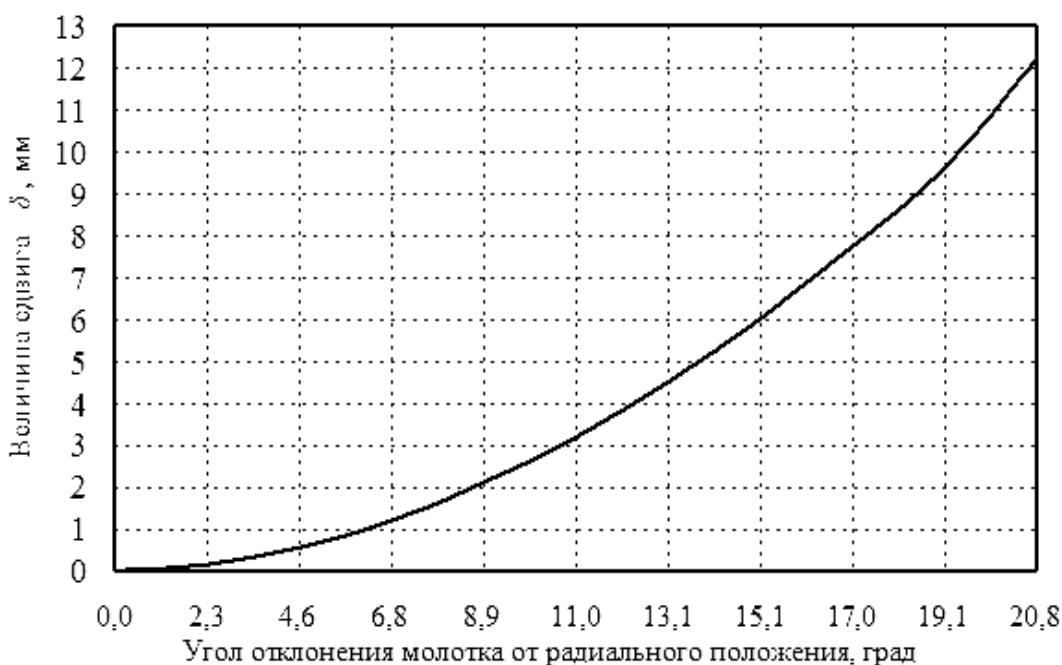


Рис. 5. График зависимости величины сдвига частицы материала по поверхности молотка при различных углах отклонения молотков

этим увеличится степень износа за счет трения, возникающего при скольжении куска сырья по ударной поверхности.

В ходе производственного эксперимента в условиях участка подготовки шихты агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» были проведены промышленные испытания дробилки ДМРиЭ 14,5×13 в течение 30 суток. Технико-эксплуатационные характеристики дробилки при проведении эксперимента: масса молотка – 17,6 кг, радиус подвеса молотка – 0,43 м, расстояние от оси подвеса до внешней грани ударной части молотка – 0,295 м, глубина внедрения частицы материала в рабочую зону молотков – 0,068 м, количество молотков, установленных на оси, – 12.

При испытаниях использовались обычный шарнирный и новый комбинированный способ установки молотков на оси подвеса.

В качестве дробимого материала использовался известняк фракцией – 40...80 мм, масса отдельных частиц которого варьируется в пределах 0,1...0,75 кг (при влажности – 4 % и насыпном весе – 2800 кг/м<sup>3</sup>).

Результаты производственных испытаний по определению степени износа рабочих органов дробилки представлены в табл. 1.

Из анализа показателей степени износа рабочих органов в процессе эксплуатации видно, что его интенсивность существенно уменьшилась. Это указывает на то, что величина сдвига частицы материала по поверхности бойка молотка при комбинированном способе подвеса существенно ниже.

Уменьшение износа распорной балки указывает на то, что траектория движения куска флюса в направлении вращения ротора при уменьшении угла отклонения молотков за счет использования нового способа крепления в значительной степени исключает возможность попадания частиц материала в распорную балку (рис. 6).

В свою очередь, увеличение износа отбойной плиты и колосников указывает на то, что большая часть материала после соударения с билами движется в направлении отбойной плиты, а не возвращается в рабочую зону молотков после удара о распорную балку.

Табл. 1. Ориентировочные кинематические показатели молотка и частицы материала и степень износа рабочих узлов и в процессе эксплуатации дробилки ДМРиЭ 14,5×13

До внедрения комбинированной конструкции крепления молотков	После внедрения
Кинематические показатели молотка и частицы материала	
Ориентировочная величина сдвига, мм	0,17...2,1      0,01...0,08
Угол отклонения, град.	1,2...8,4      0,1...0,4
Степень износа элементов дробилки, мм/сут.	
Молотки	4,15      3,1
Распорная балка	0,85      0,5
Отбойная плита	0,055      0,085
Колосники	0,46      0,51

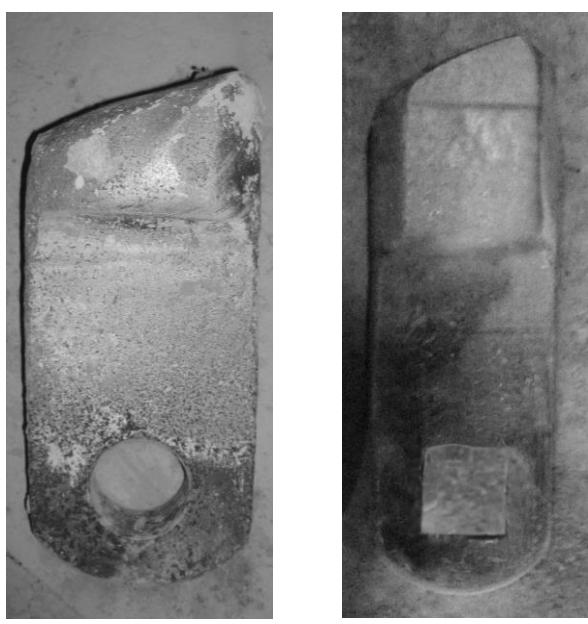


Рис. 5. Форма и степень износа молотков при различных способах крепления на оси подвеса в процессе эксплуатации молотковой дробилки:  
а – шарнирный способ крепления;  
б – комбинированный способ

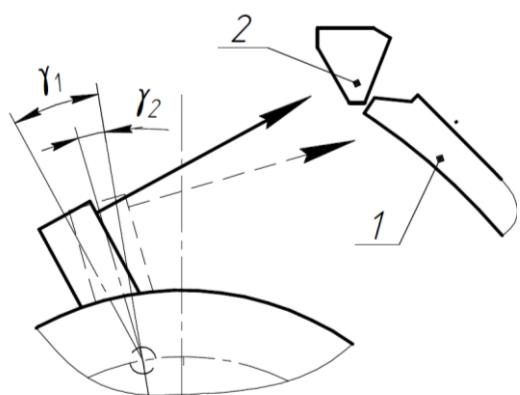


Рис. 6. Схема движения частицы после стадии соударения с молотками: 1 – отбойная плита; 2 – распорная балка;  $\gamma_1$  – угол отклонения при шарнирной установке молотков;  $\gamma_2$  – угол отклонения при комбинированном способе

Табл. 2. Эксплуатационные показатели процесса дробления в молотковой дробилке с использованием комбинированного и шарнирного способов крепления молотков

Вариант крепления	Кол-во подаваемого материала в дробилку, т/час	Содержание фракций (мм) в готовом продукте, %			Степень дробления	Удельная производительность, т/час	Удельные энергозатраты, кВтч/т
		5-10	3-5	0-3			
Шарнирное	63,62	46,3	16,8	36,9	9,72	34,16	24,03
Комбинированное	63,91	35,4	23,3	41,3	10,25	41,28	19,23

## Выводы

Угол отклонения шарнирно подвешенного молотка в конечной фазе соударения в молотковой дробилке существенно возрастает при увеличении фракции дробимого материала, а при комбинированном креплении изменяется незначительно. При увеличении угла повышается износ рабочей поверхности молотков за счет скольжения частицы флюса по ударной поверхности. При шарнирном креплении траектория движения материала в рабочем пространстве дробилки не обеспечивает попадания преобладающего количества кусков материала в зону отбойной плиты, что снижает эффективность измельчения. Таким образом, при использовании новой конструкции крепления был уменьшен износ рабочих органов дробилки и повышается срок их эксплуатации.

Производительность молотковых дробилок с комбинированной заделкой молотков на оси ротора является более высокой, чем дробилок с шарнирным креплением.

Перспективным направлением диспергирования флюсов с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик молотковых дробилок является синтез их новых конструкций, совмещающих в себе комбинацию жесткого крепления молотков в подвесе при возможности их предохранения от разрушения, например, за счет потери жесткости в момент контакта с недробимыми телами.

## Список литературы

1. Борщев, В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. – Тамбов: издательство ТГТУ, 2004. – 75 с.
2. Wolfgang, P. Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment. – Weinheim: Wiley-VCH, 2002. – 614 p.
3. Брусова, О.М. Повышение эффективности молотковых дробилок за счет обоснования рациональных параметров рабочего органа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Брусова Ольга Михайловна; УГГУ. – Екатеринбург, 2012. – 20 с.
4. Власенко, Д.А. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия / Д.А. Власенко [и др.] // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №2(5). – С. 63-68.
5. Сандыков, Э.С. Оптимизация и совершенствование технологических схем добычи и переработки известняков на основе их более полного и комплексного использования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21 / Садыков Эргестан Сабиржанович; ЮРГТУ. – Новочеркасск, 2002. – 131 с.
6. Lakshmi Shamvardhini Sydanna, T.R. Manufacturing with design and analysis of rotor shaft of hammer mill crusher / International Journal of Science. Engineering and Technology Research (IJSETR). –2017 – No5. – Р. 877-881.
7. Черепков, А.В. Совершенствование процесса измельчения зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки: дис. .... канд. техн. наук: 05. 20.01 / Черепков Александр Викторович. – Орел: ОГАУ, 2016. – 152 с.
8. ГОСТ 7090-72. Дробилки молотковые однороторные. Технические условия. Введ. 01.01.1973. Переизд. 01.01.1995. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 14 с.
9. Власенко, Д.А. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору / Д.А. Власенко, О.И. Павлищенко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – 2016. – №3. – С. 21-26.
10. Пат. 111218 Україна, МПК B02C 13/04. Ротор молоткової дробарки / Д.А. Власенко, Е.П. Левченко; заявитель и патентообладатель Д.А. Власенко, Е.П. Левченко. № и 2016 03 005; заявл. 23.03.16; опубл. 10.11.16. Бюл. №21. – 4 с.
11. Малич, Н.Г. Анализ и перспективы отечественных машин для дробления твердых материалов / Н.Г. Малич, В.С. Блохин, А.О. Дегтярев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №1. – С. 365-380.
12. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal fur die reine und angewandte Mathematik. – Iss.92. – Vol.1882. – 2009. – S. 156-171.
13. Laursen, T.A. Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis. – New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 454 p.
14. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1995. – 416 с.
15. Власенко, Д.А. Влияние параметров подачи материала в рабочую зону молотковой дробилки на условия процесса соударения / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2018. – Вып.51. – С. 140-144.
16. Сидашенко, А.И. Теоретическое и экспериментальное определение угла отклонения молотка в момент удара о материал // Прогрессивные технологические способы и процессы восстановления деталей сельскохозяйственной техники. – М.: МИИСП, 1984. – Вып.14. – С.37-42.

**D.A. Vlasenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/**  
Donbass State Technical University (Alchevsk)

## **THE EFFECT OF PARTICLE SIZE OF RAW MATERIALS ON THE KINEMATICS OF WORKING BODIES AND MATERIAL IN HAMMER CRUSHER**

**Background.** Crushing processes are very energy-intensive and involve a large loss of metal due to wear of working elements in the operation of crushing machines. This fact determines the importance of studying and improving these processes in order to increase the service life of individual working bodies and units of hammer mills and increase the productivity of crushing machines.

**Materials and/or methods.** The used mathematical model based on Newton's second law (the differential law of mechanical motion) and Hertz's static shock theory. The aim of this study is to determine the angular position of the hammers relatively to their radial position in the final stage of impact on the particle and the shift values of the material under the displacement relative to the working surface of the hammer at the impact contact in the crusher in the process of preparing fluxes with the combined and hinge mount of a beater on the suspension axis of the rotor.

**Results.** The results obtained of the mathematical modeling of the process of hammer and particle collision with the combined and hinge attachment of the hammers to the suspension axis of the rotor. Determined the dependence of the values of the deflection angle and the shift of particles on the hammer impact surface on the fractional composition of the crushed material in the process of collision. The values of wear of the working bodies of the hammer crusher in the course of industrial experiment determined.

**Conclusion.** The deflection angle of a pivotally suspended hammer in the final phase of collision in the hammer mill increases significantly with increasing the fraction of the crushed material, and not significantly changed with the combined attachment. As the angle value increases, the wear of the working surface of the hammer increased by sliding the flux particle along the working surface of the hammer. With the hinge attachment, the trajectory of the material in the working space of the crusher does not provide the entry of the dominant number of material pieces in the area of a bumper plate. Thus, when using a new design of hammer attachment, the wear of individual working bodies of the crusher reduced and the service life increased. The performance of hammer crushers with a combined mount of hammers on the rotor axis is higher compared to crushers having their hinge mount.

**Keywords:** hammer crusher, hammer, deflection angle, the shift value of the particles at the impact surface.

### **Сведения об авторах**

#### **Д.А. Власенко**

SPIN-код: 6296-2040  
Телефон: +380 (72) 112-82-33  
Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

#### **Э.П. Левченко**

Телефон: +380 (72) 154-74-30  
Эл. почта: levchenckoeduard@yandex.ua

*Статья поступила 13.03.2018 г.*

*© Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, 2018  
Рецензент д.т.н., доц. Н.А. Ченцов*

Видеожурнал **“ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИК”**

смотрите каждую субботу

на телеканале **ОПЛОТ 2**

<https://goo.gl/d2kKr0>