

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Для подтверждения достоверности математической модели определения энергосиловых параметров и обоснования снижения энергоемкости роторной зубчатой дробильной машины при использовании роторов с нелинейным расположением зубьев звездочек в лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования процесса дробления материалов в физической модели дробилки с типовой и усовершенствованной конструкцией рабочего органа. Подтверждена эффективность использования рабочих органов со спиральным расположением зубьев звездочек на валу, позволяющих снизить момент сопротивления на валу ротора в процессе дробления, что позволит повысить энергоэффективность дробилки.

Ключевые слова: роторная зубчатая дробилка, нелинейное расположение зубьев на роторе, физическая модель, эксперимент, энергосиловые параметры, момент сопротивления.

Постановка проблемы

Агломерация является одной из основных операций при подготовке шихтовых материалов к доменной плавке. Главная цель данного процесса состоит в том, чтобы превратить мелкодисперсное железорудное сырье в более крупные куски – агломерат, использование которого в доменном процессе обеспечивает формирование слоя шихтовых материалов необходимой газопроницаемости, что является обязательным условием эффективной и высокопроизводительной работы доменного агрегата [1...3].

Перед подачей в доменную печь агломерационный пирог необходимо раздробить на отдельные куски требуемого фракционного состава [1...3]. Для этих целей на большинстве ведущих предприятий черной металлургии применяют роторные зубчатые дробилки (в предлагаемой классификации [4,5] рассматриваются как отдельный класс) с колосниковой решеткой [4...6].

Наиболее существенным недостатком дробилок данного типа с линейным расположением зубьев звездочек на роторе является относительно невысокая стабильность гранулометрического состава дробленого материала. Так, например, в процессе фракционной подготовки железорудного агломерата в дробилке данного типа наряду с крупными кусками образуется большое количество средних кусков, обладающих относительно невысокими прочностными характеристиками, что негативно сказывается на сохранности готового продукта при транспортировке и многочисленных перегрузках [2,7,8,9]. На фракционный состав готовой продукции существен-

ное влияние оказывает вид деформации, возникающий от действия сил дробления, – способ разрушения (сжатие, изгиб, срез, свободный и стесненный удар и т.д.) [4,6,10,11]. При этом пределы прочности хрупких материалов при различных видах деформации существенно различаются, что сказывается на энергосиловых параметрах всего процесса фракционной подготовки материала в дробильной машине [10,11].

Способы разрушения, применяемые в роторных зубчатых дробилках в настоящее время, остаются относительно малоэффективными в плане энергозатрат и сопряжены со значительным износом рабочих органов [4,6], поэтому изучение и совершенствование дробильных машин с целью улучшения их основных технико-экономических показателей является весьма актуальной задачей и может существенно влиять на эффективность всего технологического процесса, связанного с фракционной подготовкой материалов [1,2,7].

Анализ последних исследований и публикаций

Существует множество конструкций роторных зубчатых дробилок и их рабочих органов [4...6]. В настоящее время наибольшее распространение в производстве агломерата нашли тихоходные однороторные зубчатые дробилки с зубьями, расположенными в один ряд относительно оси вращения ротора (линейное расположение). Однако такая конструкция имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что основная часть пирога дробимого материала при загрузке полностью проникает в рабочее про-

странство дробилки за время поворота ротора от поверхности нерабочей грани уходящего до рабочей грани зубьев следующего ряда без контактного взаимодействия со звездочками, вследствие чего разрушение большинства кусков аглоспека происходит в зоне колосниковой решетки, что не позволяет обеспечить стабильность фракционного состава дробленого агломерата [4,6,10]. Такие условия процесса дробления существенно сказываются на энергосиловых параметрах привода дробилки, так как сила, возникающая при разламывании пирога агломерата о колосниковую решетку, значительно больше, нежели при его разрушении о консольную часть приемного стола [10].

Для устранения вышеперечисленных недостатков предложена усовершенствованная конструкция ротора с нелинейным (шевронным или спиральным) расположением звездочек [12...14], при котором материал вступает в одновременное контактное взаимодействие не со всем рядом зубьев, а только с их частью. При такой конструкции рабочего органа дробильной машины пирог материала упирается в торцевую часть расположенных с угловым смещением звездочек и останавливает свое дальнейшее перемещение в рабочее пространство дробилки. За счет этого обеспечивается его поэтапное (от одного продольного ряда зубьев звездочек к другому) проникновение в рабочее пространство ротора. Таким образом, в случае использования в дробилке ротора с нелинейным расположением зубьев звездочек на роторе достигается многократное наложение разрушающих нагрузок на аглопирог, что позволяет обеспечить разрушение большей части аглоспека за счет его изгиба относительно внешней грани приемного стола, а не излома и раздавливания об поверхность колосниковой решетки.

Данная конструкция позволяет не только стабилизировать фракционный состав дробленого продукта, но и практически исключить негативное влияние силы, возникающей при дроблении материала в зоне колосниковой решетки, на энергоемкость процесса дробления, что позволит уменьшить потребляемую мощность двигателя привода [10,12,13,15].

В работах [10,15] предложена математическая модель процесса дробления в роторных зубчатых дробилках, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса дробления материалов в дробильной машине, и теоретически обосновано повышение эффективности применения роторов с нелинейным расположением зубьев звездочек, однако данная методика экспериментально не подтверждена и не проверена

адекватность ее применения в условиях фракционной подготовки различных материалов в дробильных машинах данного типа.

Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования являются: подтверждение достоверности математической модели процесса дробления различных материалов в роторной зубчатой дробильной машине с линейным и спиральным расположением зубьев звездочек на роторе при проведении эксперимента на физической модели дробилки в лабораторных условиях по определению энергосиловых параметров привода; обоснование повышения энергоэффективности усовершенствованной конструкции рабочего органа.

Основной материал исследования

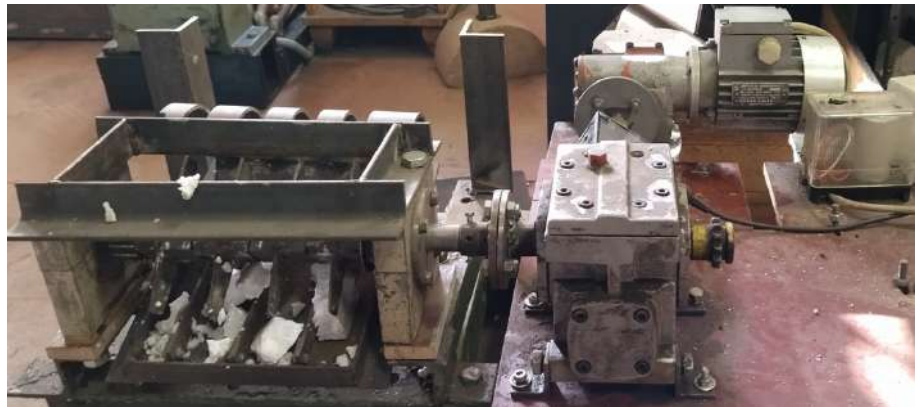
Для проверки эффективности принятых технических решений и достоверности разработанного аналитического способа определения энергосиловых параметров процесса дробления различных материалов в роторных зубчатых дробилках применялся экспериментальный метод построения точечных оценок параметров [16] с использованием лабораторного стенда, состоящего из натурной (физической) модели однороторной зубчатой дробилки и контрольно-измерительного комплекса (рис. 1). Исследование энергосиловых параметров процесса дробления основывалось на определении моментов сопротивления от сил, возникающих при разрушении материала в дробилках с роторами линейного и спирального типа, с помощью тензорезисторных преобразователей [17], и дальнейшем сравнительном анализе результатов.

Для экспериментального изучения процесса дробления использовалась физическая модель однороторной зубчатой дробилки (безразмерный геометрический симплекс [18], характеризующий геометрическое подобие экспериментальной установки реальной роторной зубчатой дробилке, используемой при фракционной подготовке агломерата в условиях агломерационного цеха филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», составляет $\Gamma_K = \frac{1}{10}$) (рис. 1).

Определение момента сопротивления на валу ротора, возникающего в процессе дробления материала и преодолеваемого электродвигателем привода, осуществлялось с помощью измерительного комплекса (рис. 2а), в состав которого входят: тензорезисторный преобразователь (рис. 2б), размещенный между тихоходным валом быстроходного и быстроходным валом тихоходного червячных редукторов; четырехканальный



а)



б)

Рис. 1. Лабораторный стенд (а) и физическая модель (б) для исследования энергосиловых параметров процесса дробления в однороторной зубчатой дробилке

усилитель переменного тока УТ 4-1 ТУ 25.06.1377-82; электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) с установленной на ее шине платой L-154 12-тиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD.

Снимаемый с тензорезисторного преобразователя электрический сигнал после усиления и преобразования в цифровой код поступал в системный блок ПЭВМ для обработки с последующим отображением на экране в виде цифрового сигнала.

Тарировка тензорезисторного преобразователя выполнялась по крутящему моменту: на рычаг с плечом 0,11 м, закрепленный на присоединительном хвостовике, поочередно навешивали грузы массой 0,32 кг, 0,33 кг, 0,73 кг и 0,68 кг.

В процессе тарировки на мониторе выводился график зависимости значений цифрового выхода сигнала АЦП от величины момента на валу тензорезисторного преобразователя.

Коэффициент отношения величины момента к значению сигнала цифрового выхода кода АЦП, полученного по результатам тарировки, определялся по следующей зависимости:

$$k_{АЦП} = \frac{m_{gp} g i_{m.p.} l_p \eta'_{np}}{\Delta_{АЦП}}, \quad (1)$$

где m_{gp} – масса груза, кг; g – ускорение свободного падения, $\frac{M}{c^2}$; $i_{m.p.}$ – передаточное число тихоходного червячного редуктора; l_p – длина плеча рычага, м; η'_{np} – общий коэффициент полезного действия (к.п.д.) узлов и механизмов привода лабораторной дробилки, установленных в кинематической схеме между точкой приложения силы дробления материала (ротором) и тен-

зорезисторным преобразователем; $\Delta_{АЦП}$ – изменение значения цифрового выхода сигнала АЦП.

Общий к.п.д. узлов и механизмов привода дробилки η'_{np} определялся как:

$$\eta'_{np} = \eta_p \eta_M \eta_n, \quad (2)$$

где η_p , η_M , η_n – к.п.д. тихоходного червячного редуктора, тихоходной муфты между ротором и тихоходным редуктором, подшипниковых опор ротора соответственно.

Параметры привода лабораторной установки, используемой при проведении исследований, имели следующие значения: передаточное число редуктора – $i_{m.p.} = 12$; к.п.д. редуктора – $\eta_p = 0,8$ [19]; к.п.д. соединительной муфты – $\eta_M = 0,97$ [19]; к.п.д. подшипниковых опор ротора – $\eta_n = 0,99$ [19].

На основании результатов тарировки тензорезисторного преобразователя получены значения цифрового выхода сигнала АЦП и с помощью зависимости 1 определены коэффициенты соотношения момента сопротивления на валу ротора и величины цифрового выхода сигнала АЦП для каждого крутящего момента (табл. 1).

Среднее значение коэффициента соотношения крутящего момента на валу ротора и значения цифрового выхода сигнала АЦП составило 0,0214.

В качестве материала, моделирующего поведение агломерационного спека при дроблении его в лабораторной установке, применялся пенопласт ПСБ-30-30 [20] в виде нарезанных из него плиток определенного размера. Сравнение геометрических и физико-механических характеристик образца пенопласта и пирога железорудного агломерата, производимого в условиях агломерационного цеха филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», представлены в таблице 2.

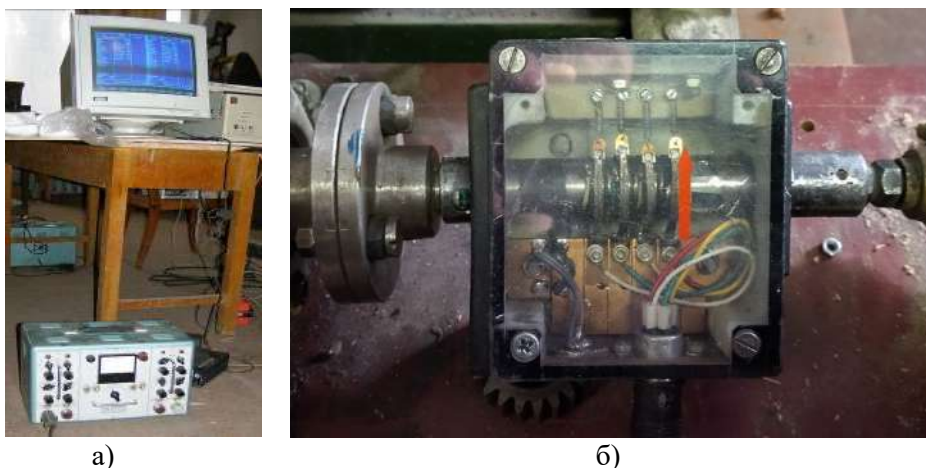


Рис. 2. Измерительный лабораторный комплекс (а) с тензорезисторным преобразователем (б)

На основании сравнительного анализа основных характеристик пирога агломерата и плиток пенопласта ПСБ-30-30 можно утверждать, что соответствие геометрического подобия образцов пенопласта и пирога агломерата и геометрического симплекса подобия экспериментальной установки и дробильной машины ДО-1300-2700-61 соблюдается. При этом величины пределов прочности сравниваемых материалов являются значениями одного порядка, что говорит об аналогичности процесса дробления пенопласта в физической модели дробилки условиям процесса дробления агломерата в реальных производственных условиях.

Для сравнения энергосиловых параметров процесса дробления в лабораторной роторной зубчатой дробилке применялись два типа роторов: с линейным (рис. 3а) и со спиральным расположением зубьев звездочек (рис. 3б).

Отличие дробильной машины с ротором нелинейного типа заключается в расположении звездочек на валу таким образом, что в процессе дробления в контактное взаимодействие с пирогом дробимого материала вступают не все зубья одного ряда одновременно (как это реализовано в дробилках с линейным расположением звездочек на роторе [12...14]), а только один или их определенное количество [12...14] (рис. 3б). Это обеспечивается за счет того, что звездочки, расположенные на валу по ходу от одного к друго-

му краю ротора, повернуты относительно своей оси вращения в обратную сторону от направления вращения ротора дробилки по отношению к предыдущей так, что обеспечивается одинаковый угол между осями зубьев соседних звездочек, определяемый по следующей зависимости [12]:

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2(N_{зв}-1)}, \quad (3)$$

где $N_{зв}$ – количество звездочек на роторе, шт.

В ходе экспериментальных исследований процесса дробления в лабораторной дробилке определялся крутящий момент при разрушении образца пенопласта определенной длины (0,1 м и 0,11 м) при использовании роторов с линейным и спиральным расположением зубьев звездочек на роторе.

Первоначально перед исследованиями самого процесса дробления материалов в физической модели роторной зубчатой дробилки определялся крутящий момент на ее холостом ходу, который составил 3,1 Нм.

На следующем этапе испытаний образец пенопласта устанавливался в рабочем пространстве ротора и запускался электродвигатель привода. Время процесса дробления образца для всех опытов задавалось 60 секунд (время, за которое

Табл. 1. Результаты тарировки тензорезисторного преобразователя

Масса груза, кг	Крутящий момент на валу преобразователя, Нм	Значения цифрового выхода сигнала АЦП, $\Delta_{АЦП}$	Коэффициент соотношения крутящего момента на валу ротора и значения цифрового выхода сигнала АЦП, $\frac{Нм}{\Delta_{АЦП}}$
0,32	0,0352	145	0,0214
0,65	0,0715	290	0,0218
1,38	0,1518	640	0,0209
2,06	0,2266	930	0,0215

Табл. 2. Физико-механические характеристики образца пенопласта и пирога агломерата

Параметр	Материал	
	Агломерат	Пенопласт
Длина L_n , м	1,0	0,1...0,11
Ширина B_n , м	2,8	0,28
Толщина h_n , м	0,3...0,35	0,03
Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	~3500	35
Предел прочности при изгибе σ_u , МПа	0,46*	0,2**

* – данный параметр определялся согласно [11];

** – значение предела прочности определялось опытным путем согласно методу [20].

весь кусок дробимого материала оказывался в зоне колосниковой решетки. Затем с монитора ПЭВМ снимались графики значений цифрового выходасигнала АЦП. Аналогичная процедура применялась при исследовании процесса дробления пенопласта в лабораторной дробилке с ротором спирального типа.

Графики значений момента сопротивления при дроблении образцов пенопласта различной длины в лабораторной дробилке с линейным и спиральным расположением зубьев звездочек на роторе представлены на рисунке 4.

Из графиков (рис. 4) видно, что зависимости моментов сопротивления при дроблении материала в лабораторной дробилке с различными типами роторов носят неоднородный характер. Среднее значение моментов (определялось с помощью метода площадей [21]) при использовании роторов с нелинейным расположением зубьев звездочек в первом случае при дроблении образца длиной 0,1 м увеличилось в 1,3 раза, а во втором (для образцов длиной 0,11 м) уменьшилось в 1,6 раза по сравнению с условиями применения в установке с рабочим органом линей-

ного типа. Это обусловлено тем, что в зоне колосниковой решетки процесс принимает неконтролируемый характер и во взаимодействие с материалом вступают все зубья ротора одновременно. Однако при этом пиковые (максимальные) значения в течение всего цикла дробления уменьшились в 1,3 и 2,1 раза (для первого и второго случая соответственно).

В то же время внимания заслуживает первая стадия процесса дробления (проникновение материала в рабочее пространство ротора), при которой происходит контактное взаимодействие материала с зубьями звездочек на первой стадии (в условиях дробления в лабораторной установке время проникновения отдельных кусков материала в зону колосников составило порядка 10...20 с). В этих условиях материал еще не проник в зону колосниковой решетки и пирог дробится только за счет контакта с одним рядом зубьев. Энергосиловые параметры процесса на данной стадии представлены на рисунке 5.

Как видно из графиков, отображенных на рисунке 5, при использовании линейного типа роторов наблюдается резкое увеличение момента

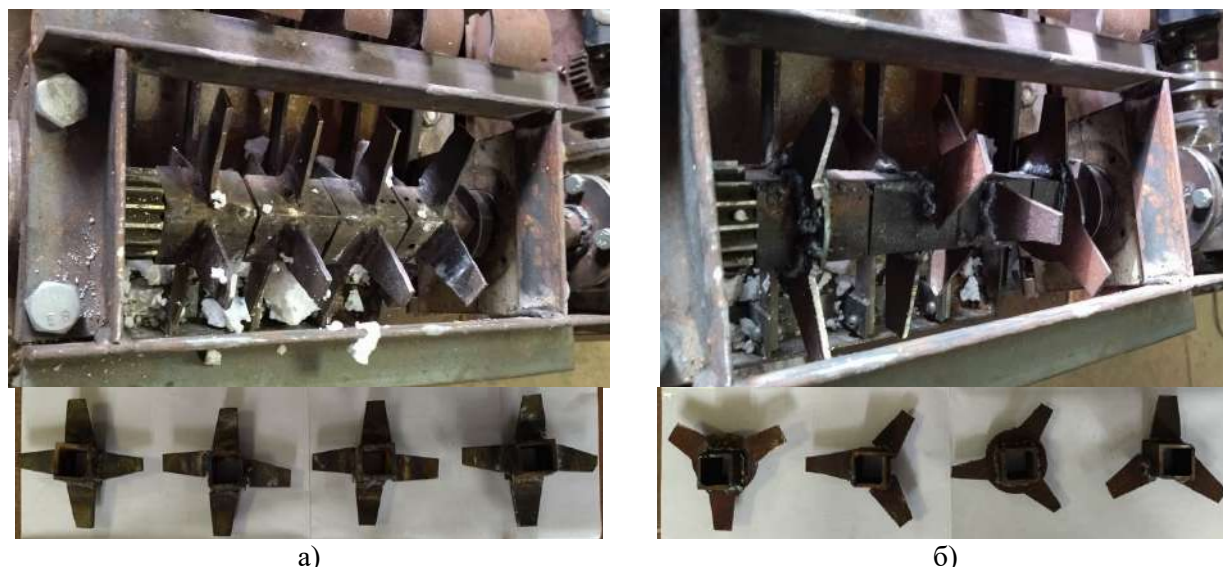


Рис. 3. Дробилка с ротором и звездочки линейного (а) и спирального (б) типов

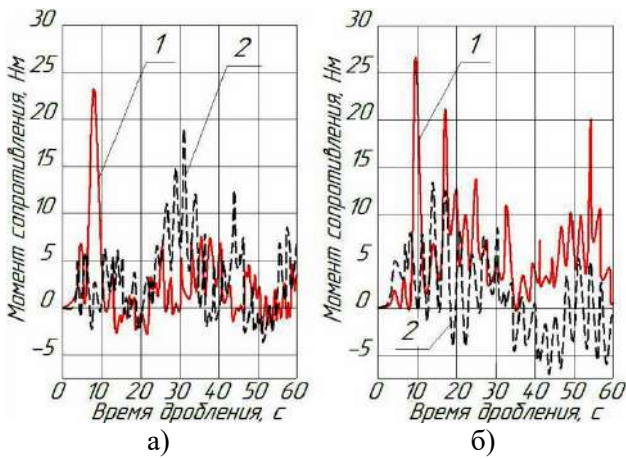


Рис. 4. Графики зависимостей момента сопротивления при дроблении образцов пенопласта длиной 0,1 м (а) и 0,11 м (б) в дробилке с ротором линейного (1) и спирального типа (2)

сопротивления при контакте всего ряда зубьев звездочек с поверхностью дробимого материала, а в дробилке с усовершенствованной конструкцией ротора изменение момента носит менее скачкообразный характер. В случае применения роторов со спиральным расположением зубьев звездочек пиковые значения момента в течение данного цикла дробления уменьшились в 3,5 и 2,1 раза (для образцов длиной 0,1 и 0,11 м соответственно).

Среднее значение моментов при использовании ротора с нелинейным расположением зубьев звездочек снизилось в первом случае (при дроблении образца длиной 0,1 м) в 1,8 раза, а во втором (для образца длиной 0,11 м) в 1,5 раза по сравнению с условиями применения в установке линейного типа ротора. Как оговаривалось выше, это обусловлено тем, что в зоне приемного стола с использованием ротора со спиральным расположением зубьев звездочек процесс принимает более контролируемый характер по сравнению с условиями применения линейного типа ротора в дробилке.

Согласно математической модели процесса дробления в роторных зубчатых дробилках, описанной в работе [10], зависимость момента сопротивления, возникающего при разрушении пирога в начальной стадии (в районе приемного стола), без учета силы трения от силы тяжести материала $F_{тр.т.н.}$ (при такой конструкции дробилки она отсутствуют) выглядит как:

$$M_{с.Σ} = (F_{н.с.} + F_{κ}) \frac{D_p}{2}, \quad (4)$$

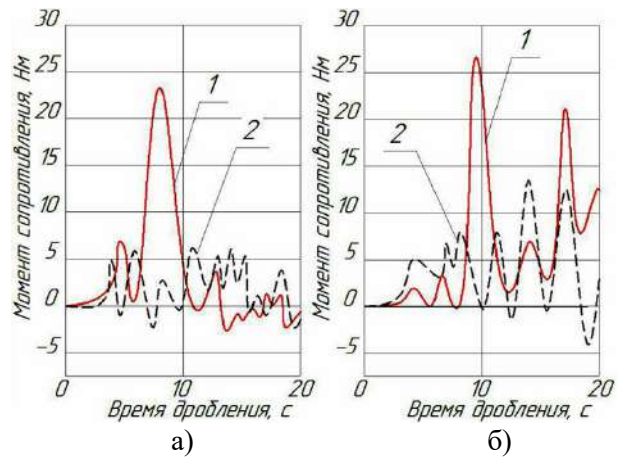


Рис 5. Графики момента сопротивления на этапе начального проникновения материала длиной 0,1 м (а) и 0,11 м (б) в рабочее пространство дробилки с ротором линейного (1) и спирального (2) типа

где $F_{н.с.}$ – сила, действующая на звездочку при дроблении материала в районе приемного стола, Н; $F_{κ}$ – сила дробления, возникающая при дроблении материала о колосники, Н; D_p – диаметр внешней (торцевой) грани звездочек ротора, м.

Сила $F_{н.с.}$ определяется из зависимости, предложенной в работах [10,13]:

$$F_{н.с.} = \frac{B_n h_n \sigma_u}{4 \cos \alpha_{зв}}, \quad (5)$$

где $\alpha_{зв}$ – угол контакта рабочей поверхности звездочки с поверхностью пирога, рад.

Сила дробления $F_{κ}$ численно равна силе сопротивления пирога материала деформации в данном сечении [10,13]:

$$F_{κ} = \frac{k_{р.н.с.} N'_{зв} \sigma_u h_n a_{κ}^2}{6 B_{κ} \cos \alpha_{зв.κ}}, \quad (6)$$

где $k_{р.н.с.}$ – коэффициент, учитывающий длину отдельных, вновь образовавшихся кусков материала при падении, взаимодействующих с определенным количеством зубьев, при условии разрушения пирога в момент соударения с поверхностью приемного стола и зубьями ротора; $N'_{зв}$ – количество звездочек, одновременно вступающих во взаимодействие с материалом на колосниковой решетке, шт.; $a_{κ}$ – ширина отдельных кусков пирога материала после первой стадии дробления, м; $B_{κ}$ – расстояние между

Табл. 3. Значения моментов сопротивления при дроблении пенопласта и гипсокартонной плиты

Номер эксперимента	Значение момента по зависимости (4), Нм	Экспериментальное значение момента, Нм	Отклонение, Нм
Пенопласт			
1	25,94	27	1,06
2	23,98	23	0,98
3	20,04	18	2,04
4	19,55	13	6,55
Гипсокартонная плита			
5	34,21	36	1,79
6		31	3,21

соседними колосниками (колосниковый зазор), m ; $\alpha_{зв.к.}$ – угол между рабочей поверхностью лопасти звездочки ротора и поверхностью пирога при их взаимном контакте на колосниковой решетке, рад.

В условиях проведения эксперимента угол $\alpha_{зв.к.}$ составил 0,44 рад, угол $\alpha_{зв.к.}$ – 0,7 рад, количество звездочек $N'_{зв} = 4$ шт., ширина a_k принималась равной половине длины пирога $0,5L_n = 0,05 \dots 0,055$ м, расстояние $B_k = 0,045$ м, диаметр ротора $D_p = 0,13$ м. Коэффициент длины $k_{р.п.с.}$ в данных условиях равен 1,0.

Для уменьшения случайной составляющей погрешности результатов определения крутящего момента в процессе дробления в лабораторной дробилке дополнительно проводились исследования по дроблению образцов, изготовленных из гипсокартонной плиты (предел прочности на изгиб определялся согласно методу [23] и составил 3,5 МПа).

Значения моментов сопротивления, полученные после обработки результатов всех экспериментов, представлены в таблице 3.

Сравнительный анализ результатов (табл. 3) подтверждает адекватность разработанного метода определения энергосиловых параметров. При этом относительная погрешность результатов определения момента сопротивления аналитическим методом составила 11,0 % (величина доверительной вероятности при числе опытов $n_o = 6$ принималась равной $\alpha = 0,9$ [23]) по сравнению с результатами, полученными в ходе эксперимента в лабораторных условиях, что говорит о достаточно высокой степени достоверности разработанной математической модели [23].

Выводы

С помощью физической модели в лабораторных условиях проведен эксперимент по определению энергосиловых параметров процесса

дробления материалов в роторной зубчатой дробилке с различными типами роторов.

При проведении эксперимента в лабораторных условиях по определению моментов сопротивления, возникающих в процессе дробления, обосновано повышение энергоэффективности усовершенствованной конструкции дробилки со спиральным расположением зубьев звездочек на роторе по сравнению с линейным.

На основании полученных результатов эксперимента подтверждена достоверность математической модели процесса дробления в роторной зубчатой дробильной машине. Проведенные экспериментальные исследования показали достаточно высокую сходимость с теоретическими результатами на уровне 89 %, что свидетельствует об адекватности разработанного метода.

Перспективным и в то же время необходимым направлением развития данных исследований является внедрение роторной зубчатой дробилки с нелинейным расположением зубьев звездочек на роторе и исследование энергосиловых параметров процесса дробления агломерата в промышленных условиях, что в свою очередь позволит обосновать повышение технико-эксплуатационных характеристик дробилок с усовершенствованными конструктивными особенностями.

Список литературы

1. Subba Rao, D.V. Minerals and Coal Process Calculations / D.V. Subba Rao. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
2. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Т.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
3. Treatise on Process Metallurgy, Vol. 3: Industrial Processes / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751 p.
4. Власенко, Д.А. Уточненная классификация отдельных типов дробильного оборудования предприятий черной металлургии / Д.А.

- Власенко, Э.П. Левченко // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: ГОУ ВО ЛНУ им. В. Даля. – №6(48). – 2021. – С. 43-50.
5. Гребеник, В.М. Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование фабрик окускования и доменных цехов: учеб. для вузов / В.М. Гребеник [и др.] – К.: Вища школа, 1985. – 312 с.
 6. Власенко, Д.А. Технические решения в области проектирования и повышения эффективности дробильно-измельчительных машин / Д.А. Власенко // Инновационные перспективы Донбасса. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 88-92.
 7. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
 8. Малыгин, А.В. Научные основы и практика совершенствования процесса получения железорудного агломерата с высокими потребительскими свойствами: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.02 / Малыгин Александр Викторович. – Екатеринбург, 1999. – 453 с.
 9. Raygan, Sh. Influence of talc additive on cold strength and reducibility of iron ore sinters compared to bentonite / Sh. Raygan [et al.] // Ironmaking & Steelmaking. – 2009. – Vol.36. №.4. – pp. 273-278.
 10. Власенко, Д.А. Аналитический способ определения мощности привода зубчатой роторной дробилки / Д.А. Власенко // Сб. науч. трудов ДонГТИ. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2021. – №22(65). – С. 90-99.
 11. Власенко, Д.А. Анализ условий дробления железорудного агломерата при реализации различных видов деформаций / Д.А. Власенко, М.В. Синицин // Сборник материалов научно-технической конференции «Донбасс будущего глазами молодых ученых». – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 26-31.
 12. Пат. №196194 РФ, МПК В02С 4/00, В02С 4/28, В02С 4/30. Ротор одновалковой зубчатой дробилки / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко, В.В. Мороз, А.С. Мягков; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. – №2019137708; заявл. 21-11-2019; опубл. 19-02-2020, бюл. №5. – 6 с.
 13. Власенко, Д.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров одновалковой дробилки железорудного агломерата с шевронным расположением зубьев звездочек ротора / Д.А. Власенко // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. – Вып. 19 (62). – С. 69-79.
 14. Жильцов, А.П. Анализ и совершенствование конструктивно-технологических параметров дробилок агломерационной шихты и агломерата / А.П. Жильцов [и др.] // Вестник Липецкого государственного технического университета. – Липецк: ФГБОУ ВО «ЛГТУ», 2021. – №3(46). – С. 86-92.
 15. Власенко, Д.А. Методика определения энергосиловых параметров процесса дробления агломерата изломом в одновалковой дробилке / Д.А. Власенко // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Сборник материалов. Том II – М.: Центр научно-технических решений (АНО ЦНТР), 2020. – С. 377-381.
 16. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
 17. Измерения в промышленности. Справочник. Изд. В 3-х книгах. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.
 18. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1987. – 423 с.
 19. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. / Под ред. И.Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т.2. – 912 с.
 20. ГОСТ 15588-70 Плиты теплоизоляционные из пенопласта полистирольного. Введ. 01-10-1970. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 8 с.
 21. Морозов, В.В. Обработка результатов эксперимента. Учебное пособие / В.В. Морозов, Б.Е. Сobotковский, И.Л. Шейнман. – Санкт-Петербург: СПГЭУ, 2004. – 63 с.
 22. ГОСТ 6266-97 Листы гипсокартонные. Технические условия. Введ. 04-01-1999. – М.: МНТКС, 1999. – 30 с.
 23. Звонарев, С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С.В. Звонарев. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. – 112 с.

D.A. Vlasenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbass State Technical Institute (Alchevsk)

**EXPERIMENTAL STUDY OF ENERGY POWER PARAMETERS
OF THE PROCESS OF GRINDING MATERIALS
IN A ROTARY GEAR CRUSHER**

Background. Fractional preparation of sinter in the conditions of metallurgical enterprises is very energy intensive, while high requirements are imposed on the physical and technical indicators of the finished product, which determines the importance of this study and improvement of these processes in order to reduce energy costs and improve the quality indicators of the crushing process.

Materials and/or methods. The paper uses the method of physical modeling of the process of crushing materials using a laboratory stand, consisting of a full-scale model of a single-rotor toothed crusher and a control and measuring complex. The purpose of this work is to substantiate the increase in the efficiency of using an improved design of the working body of the crusher and confirm the adequacy of the method for determining the energy-power parameters of the process of crushing materials in a rotary toothed crusher with various types of rotors.

Results. With the help of a physical model in laboratory conditions, an experiment was carried out to determine the energy-power parameters of the process of crushing materials in a rotary toothed crusher with various types of rotors. When conducting an experiment in laboratory conditions to determine the moments of resistance arising in the process of crushing, it is justified to increase the energy efficiency of an improved design of a crusher with a spiral arrangement of sprocket teeth on the rotor compared to a linear one. On the basis of the data obtained, the reliability of the mathematical model of the crushing process in a rotary toothed crusher was confirmed. The conducted experimental studies showed sufficient convergence with the theoretical results at the level of 89%, which indicates the reliability of the adopted mathematical model.

Conclusion. A promising and at the same time necessary direction for the development of these studies is the introduction of a rotary gear crusher with a non-linear arrangement of sprocket teeth on the rotor and the study of the energy-power parameters of the sinter crushing process in industrial conditions, which in turn will justify the increase in the technical and operational characteristics of crushers with improved design features.

Keywords: impact crusher, non-linear arrangement of teeth on the rotor, physical model, experiment, power parameters, moment of resistance.

Сведения об авторе

Д.А. Власенко /к.т.н./

SPIN-код: 6296-2040

ORCID iD: 0000-0002-6829-061X

Телефон: +380 (72) 179-70-56

Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Статья поступила 25.01.2022 г.

© Д.А. Власенко, 2022

Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев