

РАСЧЕТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ И ТОНКОГО ПОМОЛА

Замота Т.Н.¹, Павленко А.Т.¹, Левченко О.А.², Левченко М.Э.²

¹Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск;

²Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Ключевые слова: дробление, одновалковая зубчатая дробилка, молотковая дробилка, измельчение, тонина помола, измельчитель, мельница, фракционный состав, тонкий помол.

Аннотация. Работа посвящена вопросам обоснования расчётов основных характеристик аэродинамического классификатора-измельчителя, обеспечивающего процесс тонкого измельчения различных материалов, наиболее часто применяемых в металлургической отрасли производства. Рассмотрено устройство такого аппарата и основные принципы его функционирования, а также структура теоретического обоснования его работы с учётом измельчаемого материала и воздушного потока в двухфазном режиме. Представлены зависимости для определения сил, действующих на частицу при движении в потоке аэросмеси, скорости воздушного потока в абсолютном движении и скорости перемещения газодисперсной среды в классификаторе-измельчителе, что даёт возможность определить скорость частицы в момент удара о рабочие органы, выявив скорости нагружения частиц. Представлена возможность рассчитать необходимую скорость потока среды, при которой частица заданного размера и известной плотности будет смещаться в сторону разгрузочного патрубка устройства.

CALCULATIONS OF FEATURES AND EXPERIMENTAL STUDIES OF AERODYNAMIC CLASSIFIER-GRINDER FOR FINE GRINDING

Zamota T.N.¹, Pavlenko A.T.¹, Levchenko O.A.², Levchenko M.E.²

¹Lugansk State University n.a. V. Dahl, Lugansk;

²Donbass State Technical University, Alchevsk

Keywords: crushing, single-roll toothed crusher, hammer crusher, grinding, grinding fineness, crusher, mill, fractional composition, fine grinding.

Abstract. The work is devoted to the issues of substantiation of calculations of the main characteristics of an aerodynamic classifier-crusher, providing the process of fine grinding of various materials, most often used in the metallurgical industry. The structure of such a device and the main principles of its operation are considered, as well as the structure of the theoretical substantiation of its operation, taking into account the crushed material and air flow in a two-phase mode. Dependencies are presented for determining the forces acting on a particle when moving in an air mixture flow, the air flow velocity in absolute motion and the velocity of movement of a gas-dispersed medium in a classifier-grinder, which makes it possible to determine the particle velocity at the moment of impact on the working parts, revealing the particle loading rates. The possibility is presented to calculate the required medium flow velocity at which a particle of a given size and known density will shift toward the discharge branch pipe of the device.

Введение

За более чем столетний период, прошедший с момента создания измельчительных машин, достигнут значительный прогресс как в области совершенствования конструкций машин, так и в разработке методов их расчёта [1-5].

Современное производство предъявляет высокие требования качеству порошкообразных материалов, которые находят все более широкое применение во многих отраслях перерабатывающей промышленности. Удовлетворение таких требований сталкивается с необходимостью преодоления технических проблем, решение которых чаще всего пытаются найти путём реализации высокоэффективных процессов классификационного выхода готового продукта заданной крупности. Например, в агломерационном производстве, для спекания железорудной шихты применяются молотковые дробилки с целью получения извести мелких фракций [6]. При этом аглоспек получается более прочным, что улучшает качество готового

агломерата [7, 8], идущего на доменную плавку, а для его дробления одно валковые зубчатые дробилки работают более эффективно. Помимо этого, сырьё, поступающее на агломерацию и непосредственно полученный из него агломерат, требуют постоянного контроля качества и химического состава, что невозможно без предварительного его измельчения. А чем более тонко измельчён продукт, тем точнее полученные результаты его анализа.

В схемах помола эффективность процесса классификации (сепарации) обуславливает не только качество готового продукта, но и экономичность помольных машин. Процесс своевременного отделения частиц, достигших граничной крупности, оказывает весьма существенное влияние как на основной процесс использования готового порошкообразного продукта, так и на процесс в самом измельчителе для приготовления порошков, так как большая неполнота извлечения готовых частиц из мельничного продукта ведёт к существенному перерасходу энергии на размол из-за чрезмерного переизмельчения частиц готового порошка.

Особый интерес в связи с необходимостью повышения эффективности и интенсификации различных отраслей народного хозяйства представляют универсальные автономные быстроперенастраиваемые аэродинамические помольные машины (АПМ), в которых совмещаются процессы измельчения и классификации в одном аппарате. Они позволяют существенно расширить функциональные возможности динамического измельчительного оборудования, увеличить в несколько раз их производительность и улучшить гранулометрическую характеристику готового продукта.

Применением внутренних классификационных процессов удаётся значительно повысить производительность АПМ, снизить удельные энергозатраты и улучшить технологические качества измельчённых продуктов за счёт получения зерновой смеси с более узким гранулометрическим составом. При оценке дисперсности готового продукта на контрольном сите, производительность АПМ на 25-50% и, в отдельных случаях, до 300% выше, а удельное энергопотребление на 15-20% ниже. Метод тонкого измельчения твёрдых сыпучих материалов в условиях замкнутого технологического цикла, при котором наиболее тонкая фракция отбирается непосредственно из измельчителя с помощью воздушного потока, значительно облегчает регулирование тонкого помола.

Таким образом определение основных параметров аэродинамической помольной машины и экспериментальные определения её характеристик гранулометрического состава готового продукта, являются актуальными задачами, решение которых позволит получить практический эффект и повысить эффективность получения тонких фракций.

Целью работы является развитие теоретических основ расчёта основных характеристик аэроклассификатора-измельчителя и получение характеристик крупности готового продукта при измельчении различных материалов.

Основной материал исследований

Одной из перспективных разработок является аэроклассификатор-измельчитель (рис. 1) на базе многоступенчатой центробежной мельницы [9], представляющий помольную машину с внутренним и внешним рециклом измельчаемого материала и классификационным выходом готового продукта, и содержащий бильную многоступенчатую мельницу 1, загрузочный 2 и разгрузочный 3 патрубки, разгонную трубчатую камеру 4 с отводящим патрубком 5 и одним концом присоединённую к выходной ступени 6 мельницы 1, позволяющий интенсифицировать процесс измельчения и повысить качество готового продукта. Схематичное изображение АПМ (классификатора-измельчителя) представлено на рисунке 1.

В основу работы классификатора-измельчителя положен оригинальный метод замкнутого циркуляционного движения аэросмеси с совмещёнными процессами ударного взаимодействия с отбойной поверхностью частиц измельчаемого материала и их классификации в несущей газовой среде под действием центробежной и аэродинамической сил с доизмельчением частиц сверх граничной крупности посредством динамического самоизмельчения в потоке аэросмеси при пульсирующем аэродинамическом режиме.

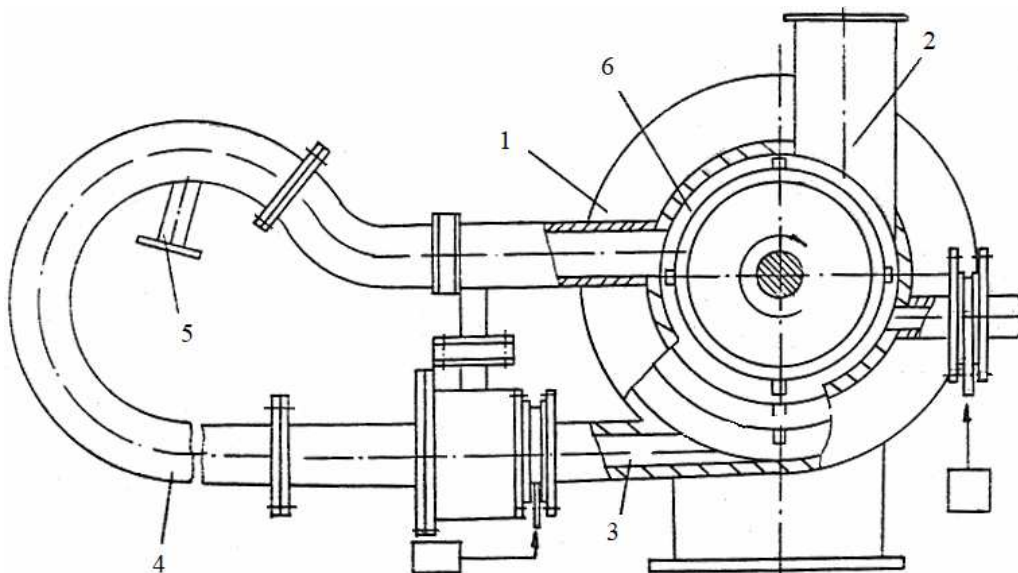


Рис. 1. Аэровоздушный классификатор-измельчитель

Основной процесс измельчения и классификации в локальном объёме АПМ (аэроклассификатора-измельчителя) является гидродинамический режим двухфазного потока и при расчёте скорости нагружения частицы необходимо учитывать воздействие на неё воздушного потока.

Уравнение сил, действующих на частицу материала при её движении в рециркулирующем потоке аэросмеси в АПМ по кольцу: мельница 1 – разгонная трубчатая камера 4 – мельница 1, будет иметь вид:

$$m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_c + \vec{F}_{n1} + \vec{F}_{n2} + \vec{F}_{кор} + \vec{F}_{цб} + \vec{F}_{tu} + \vec{F}_{mp}, \quad (1)$$

где m – масса частицы; V – скорость движения частицы; t – время движения; F_c – сила аэродинамического сопротивления; F_{n1} – сила, обусловленная изменением скорости относительного движения частицы; F_{n2} – сила, обусловленная реакцией частицы на изменение скорости несущей среды; $F_{кор}$ – Кориолисова сила; $F_{цб}$ – центробежная сила; F_{tu} – тангенциальная сила инерции; F_{mp} – сила трения частицы о поверхность рабочих органов.

Сила аэродинамического сопротивления

$$\vec{F}_c = 0,5 \cdot \rho_r \cdot f_m \cdot c_\omega \cdot V^2, \quad (2)$$

где ρ_r – плотность среды; f_m – коэффициент трения частицы материала; c_ω – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления c_ω является функцией критерия Рейнольдса для частицы, определяемого величиной относительной скорости, и может быть рассчитан по известной формуле Клячко [10]. Для учёта влияния концентрации материала в газодисперсном потоке на величину c_ω можно воспользоваться выражением [11]

$$\frac{c_Q}{c_\omega} = \exp(-17,24 \cdot c), \quad (3)$$

где c_Q – весовая концентрация материала; c – объёмная концентрация материала.

Силы F_{n1} и F_{n2} определяются по формулам

$$F_{n1} = m \cdot \frac{dV}{dt}; \quad F_{n2} = m \cdot \frac{dW}{dt}, \quad (4)$$

где W – скорость несущей среды.

При вращательном движении частицы [12, 13] на неё воздействуют Кориолисова $F_{кор} = -2 \cdot m \cdot \omega \cdot V$ и центробежная силы $F_{цб} = m \cdot \omega^2 \cdot R$, где ω – угловая скорость вращения ротора, R – радиус ротора. Различие в скоростях движения разных слоёв воздушного потока обуславливает действие тангенциальной силы инерции $F_{tu} = -2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot V$.

При движении частицы по рабочим элементам классификатора-измельчителя на неё действует сила трения $F_{mp} = N \cdot f_{ск}$, где N – сила давления частицы, действующая по нормали к поверхности скольжения, $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

Для определения скорости движения частицы по уравнению (1) необходимо знать поле скоростей воздушного потока в классификаторе-измельчителе. По характеру движения газодисперсного потока его можно разделить на две зоны: движение в роторе мельницы и в зоне измельчения и классификации.

Проводя аналогию с движением воздушного потока в рабочих колёсах центробежных машин, относительное течение сплошной фазы в первой зоне можно описать уравнением Пуассона для функции тока ψ , которое в полярных координатах будет иметь вид [10]:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{dt} \cdot r \cdot \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d\psi^2}{d\theta^2} = 2 \cdot \omega, \quad (5)$$

где ψ – функция тока; dr и dt – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие относительной скорости; r – радиус кривизны патрубка; θ – угол трения.

Радиальная ω_r и тангенциальная ω_t составляющие относительной скорости:

$$\omega_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{dW}{d\theta}; \quad \omega_t = \frac{d\psi}{dt}. \quad (6)$$

Тогда величина скорости воздушного потока в абсолютном движении определяется как:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dt} \left(r \cdot \frac{d\psi}{dt} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2\psi}{d\theta^2} = \xi; \quad (7)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = W_n + \frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot \xi)}{dr} - W_r \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d\xi}{d\theta} + V \left[\frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{d\xi}{dr} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2\xi}{d\theta^2} \right) \right]. \quad (8)$$

Таким образом, система уравнений (3) и (7) совместно с начальными и граничными условиями полностью описывает движение газодисперсной среды в классификаторе-измельчителе и позволяет определить скорость частицы в момент удара о рабочие органы, найдя скорости нагружения частиц. Можно вычислить вероятность разрушения и распределительную функцию для каждой фракции и рассчитывать гранулометрический состав полидисперсного материала на выходе из аппарата по уравнению материального баланса.

Под воздействием макрофакторов поле скоростей газодисперсного потока искажается. К наиболее существенным макрофакторам можно отнести различную степень турбулизации бил ротора, деформацию границ между макростонами, а также возмущающее воздействие быстро вращающихся бил на движение газодисперсной среды в зоне измельчения.

Принцип аэроклассификации твёрдых частиц в перемещающейся воздушной (газовой) среде заключается в том, что частица будет увлечена потоком, если скорость перемещающейся среды будет больше конечной скорости падения частицы в этой среде.

Измельченный в мельнице 1 до необходимой крупности материал с большой скоростью направляется в полость разгонной трубчатой камеры 4, где в зоне измельчения твёрдые частицы аэросмеси в замкнутом циркулирующем турбулентном потоке, соударяясь между собой и о стенки камеры само измельчаются, но не классифицируются, так как участок трубчатой разгонной камеры 4 в зоне измельчения выполнен прямолинейным или с малой кривизной. Для мелких частиц даже незначительного отклонения от первоначальной траектории движения достаточно, чтобы они попали в зону больших скоростей воздушного потока, были им захвачены и увлечены. Двигающаяся непрерывно аэросмесь подвергается интенсивному воздействию воздушного потока. Образующиеся в полости разгонной трубчатой камеры вихревые потоки способствуют деагломерации твёрдых конгломератов, что обеспечивает дополнительную очистку грубозернистого класса от мелких частиц. При повышении концентрации частиц в аэросмеси сверх критической проявляется пульсация аэросмеси, которая тоже оказывает влияние на аэродинамику потока, а, следовательно, и на условия разделения.

В зоне классификации разгонной трубчатой камеры 4, имеющей криволинейную форму знакопостоянной кривизны, твёрдые частицы разделяются за счёт взаимодействия центробежных и центростремительных сил, возникающих при резком повороте потока аэросмеси в колене, в результате чего более лёгкие частицы, движущиеся в области, прилегающей к внутренней стороне трубчатой камеры, попадают в поток энергоносителя и отводятся через разгрузочный патрубок АПМ при достижении мелкими фракциями измельчаемого материала крупности готового продукта.

Используя следующее уравнение можно рассчитать необходимую скорость потока среды V_c , при которой частица заданного размера и известной плотности будет смещаться в сторону разгрузочного патрубка АПМ:

$$V_c^2 = \frac{d\rho_c}{2 \cdot \psi_c \cdot R} \cdot V_0^2, \quad (10)$$

где ρ_c – плотность среды; ψ_c – функция тока среды; V_0 – начальная скорость.

Из уравнения (10) следует, что скорость движения частицы в сторону разгрузочного патрубка АПМ тем выше, чем больше сила динамического давления потока аэросмеси, меньше размер, плотность и угловая скорость частицы в трубчатой камере. После прохождения объединённым потоком аэросмеси криволинейного участка зоны классификации разгонной трубчатой камеры 4 происходит последующий отвод заданной фракции из полости выходного патрубка трубчатой камеры 4, соединённого выходом с полостью входной ступени мельницы 1, через обходной отводящий патрубок в полость входного патрубка трубчатой камеры 4, в результате чего в АПМ (аэроклассификаторе-измельчителе) поток аэросмеси, состоящей из частиц достигших крупности отводного продукта, циркулируют по кольцу 2: разгонная трубчатая камера 4 – отводной патрубок – разгонная трубчатая камера 4, а второй поток аэросмеси, состоящий из частиц по крупности выше крупности отводящих частиц, направляется во входную ступень ударно-отражательной измельчительной камеры бильной мельницы 1.

Заключение

1. Рассмотрена методика расчёта основных параметров аэроклассификатора-измельчителя, которая учитывает действие сил на частицу материала при её движении в рециркулирующем потоке аэросмеси.

2. Благодаря применённому аналитическому подходу имеется возможность определения скорости двухкомпонентной среды с учётом движения частицы и воздушного потока. На основе уравнения скорости движения среды с учётом её плотности, функция тока и начальной скорости можно определить требуемую скорость потока среды, когда частица определённой крупности и массы устойчиво смещается в сторону разгрузочного патрубка аэроклассификатора-измельчителя.

3. Перспективным направлением развития исследований является их адаптация к процессу контроля качества сырья, поступающего на высокотемпературное спекание и готового агломерата, направляемого на доменную плавку, например, применительно к агломерационному цеху «АМК» ООО «ЮГМК».

Список литературы

1. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2007. – 439 с.
2. Латышевский А.С., Мыльников В.Ф., Мозжухин А.С. Мельницы тонкого помола твердых топлив. – М.: Энергетическое оборудование, 1974. – 37 с.
3. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
4. Ходаков С.Г. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия. – 368 с.
6. 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.
7. Левченко О.А. Повышение эффективности дробления агломерата путем усовершенствования

конструктивных параметров одновалковой зубчатой дробилки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Донецк, 2009. – 22 с.

8. Мороз В.В., Левченко Э.П., Левченко О.А. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата // Современная наука: исследования, технологии, проекты: Сборник V международной научно-практической конференции. – М.: Научный центр "Олимп", 2015. – С. 484-489.
9. Левченко Э.П., Зинченко А.М., Левченко О.А. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-летней изобретательской деятельности). – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2018. – 353 с.
10. Соколов Ю.А., Копяев В.Н. Моделирование аэродинамики полета частицы в процессе получения гранул // Технология легких сплавов. – 2015. – №3. – С. 90-94.
11. Бобков С.П. Влияние скорости деформирования измельчаемых материалов на энергозатраты и эффективность мельниц: Дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1980. – 163 с.
12. Левченко Э.П. Интенсификация технологического процесса измельчения зерна на комбикорм в центробежно-ударной мельнице: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Луганск, 2001. – 21 с.
13. Левченко Э.П., Левченко О.А., Зинченко А.М., Мороз В.В., Власенко Д.А., Павлиненко О.И. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах: монография. – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2016. – 225 с.

References

1. Andreev E.E., Tikhonov O.N. Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment. – SPb.: Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University), 2007. – 439 p.
2. Latyshevsky A.S., Mylnov V.F., Mozhukhin A.S. Fine grinding mills for solid fuels. – M.: Power Equipment, 1974. – 37 p.
3. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
4. Khodakov S.G. Fine grinding of building materials. – M.: Stroyizdat, 1972. – 240 p.
5. Sidenko P.M. Grinding in the chemical industry. – M.: Chemistry. – 368 p.
6. Zhiltsov A.P., Vlasenko D.A., Levchenko E.P. Research and substantiation of design and technological parameters of the process of grinding agglomeration fluxes in a hammer crusher // Black Metals. 2019, no. 10, pp. 4-10.
7. Levchenko O.A. Increasing the efficiency of crushing agglomerate by improving the design parameters of a single-roll toothed crusher: Abstract of diss. ... cand. of tech. sc. – Donetsk, 2009. – 22 p.
8. Moroz V.V., Levchenko E.P., Levchenko O.A. Prospects for increasing the efficiency of blast furnace smelting by stabilizing the fractional composition of crushed agglomerate // Modern science: research, technology, projects: Collection of the V international scientific and practical conference. – M.: Scientific center "Olimp", 2015. – P. 484-489.
9. Levchenko O.A. Fundamentals of the synthesis of innovative technological processes, mechanical devices and systems (experience of 30 years of inventive activity). – Alchevsk: Donbass State Technical University, 2018. – 353 p.
10. Sokolov Yu.A., Kopyaev V.N. Modeling the aerodynamics of particle flight in the process of obtaining granules // Technology of light alloys. 2015, no. 3, pp. 90-94.
11. Bobkov S.P. Influence of the rate of deformation of crushed materials on energy consumption and efficiency of mills: Diss. ... cand. of tech. sc. – Ivanovo, 1980. – 163 p.
12. Levchenko E.P. Intensification of the technological process of grinding grain for compound feed in a centrifugal impact mill: Abstract of diss. ... cand. of tech. sc. – Lugansk, 2001. – 21 p.
13. Levchenko E.P., Levchenko O.A., Zinchenko A.M., Moroz V.V., Vlasenko D.A., Pavlinenko O.I. Dispersion of bulk materials in acceleration-impact crushing and grinding machines: monograph. – Alchevsk: Donbass State Technical University, 2016. – 225 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Замота Тарас Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта	Zamota Taras Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of motor transport
Павленко Александр Тимофеевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института гражданской защиты	Pavlenko Aleksandr Timofeevich – candidate of technical sciences, associate professor, deputy director of the Institute of civil defense
Левченко Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации машиностроительного производства	Levchenko Oksana Aleksandrovna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of technology and organization of mechanical engineering production
Левченко Максим Эдуардович – студент	Levchenko Maksim Eduardovich – student
edulep@rambler.ru	

Получена 21.07.2025