

ВАРИАНТЫ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦЫ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ВСТРЕЧНОГО УДАРА

¹Ахлюстина Н.В., ²Таугер В.М.

¹ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru;

²ГОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения»,
Екатеринбург, e-mail: V.Tauger@yandex.ru

Проведен анализ картины физических явлений, обуславливающих и сопровождающих разрушение частицы в роторе ИРВУ. Предложено рассматривать контакт разрушаемой частицы с элементами ротора по одному из трех сценариев: вход в канал и удар о рабочую плоскость элемента, удар о ребро элемента, контакт куска с внутренней поверхностью элемента и смещение его элементом до удара о ребро следующего элемента. Приведено графическое решение треугольника скоростей частицы материала шаровидной формы, находящейся между рядами зубьев ротора, определена эффективная ширина канала. Рассчитана скорость витания частицы в зависимости от плотности материала в диапазоне крупности от 100 до 400 мкм. Показано, что интенсивность создаваемого ротором воздушного потока является одним из важных факторов, влияющих на тонину помола.

Ключевые слова: измельчение, встречный удар, материал, частица воздушный поток, скорость

OPTIONS DESTRUCTION OF PARTICLES IN THE ONCOMING BLOW GRINDER

¹Akhlustina N.V., ²Tauger V.M.

¹Ural state mining University, Yekaterinburg, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru;

²Ural state University of railway transport, Ekaterinburg, R e-mail: V.Tauger@yandex.ru

The analysis of patterns of physical phenomena causing and accompanying destruction of particles in the rotor ИРВУ. It is suggested to consider the contact destructible particles with elements of the rotor in one of three scenarios: entrance channel and blow on a working plane of the element, a blow on the edge of the element, contact a piece of the inner surface of the element and an offset of the element before hitting the edge of the next element. Provides a graphical solution of the triangle of the velocities of the particles have spherical shape, located in between the rows of rotor teeth, determined the effective width of the channel. Calculated speed the transfer of a particle depending on the density of the material in the size range from 100 up to 400 mkm. It is shown that the intensity of the generated rotor air flow is one of the important factors affecting the structure of grinding.

Keywords: grinding, counter strike, material, particle, air flow, speed

Технологическое оборудование для тонкого помола различных материалов востребовано целым рядом отраслей промышленности, от пищевой до горно-обогатительной. Особый класс этого оборудования составляют измельчители с ротором встречного удара (ИРВУ), обладающие такими достоинствами, как высокая степень измельчения вследствие многократного числа столкновений частиц с пальцами барабанов роторов [5].

Поэтому вполне очевидна актуальность исследований рабочих процессов в ИРВУ, направленных на уменьшение габаритов аппарата и расхода энергии на единицу измельченного материала; на повышение коэффициента полезного действия; повышение требований к чистоте продуктов измельчения; получение более тонко измельченных материалов.

К сожалению, до настоящего времени не создано достоверной картины физических явлений, обуславливающих и сопровождающих разрушение частицы в роторе ИРВУ. Отчасти это объясняется недостаточными широкими исследованиями как теорети-

ческими, так и экспериментальными. В последнее время этим занимались буквально единицы авторов [1, 2, 3]. Хочется отметить в этой связи А.А. Гарабажиу, плодотворно работающего в данной области.

Основная же причина слабой изученности работы ИРВУ состоит в разнородности, в различной физической природе процессов. Разнообразии видов разрушения, о которых будет сказано ниже, усугубляется влиянием воздушного потока, возникающего при вращении ротора. Исследователь должен обладать глубокими знаниями в механике удара аэродинамики вентиляторов, технологии обогащения полезных ископаемых, чтобы грамотно судить обо всей гамме явлений в ИРВУ.

Движение частицы и её разрушение в измельчителе встречного удара происходит при встречном вращении двух роторов. Разрушение материала в основном ударное, имеет место также и срезание его роторами.

Первая стадия процесса начинается с загрузки сырья в виде кусков с характерным размером d_k в приемную зону

полости ротора. Куски вовлекаются ротором во вращение и отбрасываются центробежными силами к первому круговому ряду активных элементов (элементов 1). Вход в контакт куска с элементом 1 еще не сопровождается значимым ударом. Кусок получает от элемента дополнительный импульс в направлении окружной (переносной) скорости, приводящий к увеличению центробежного ускорения и, как следствие, к возрастанию радиальной (относительной) составляющей его скорости. Треугольник скоростей куска на выходе из ряда элемен-

тов 1 показан на рис. 1 и представляет собой графическое решение векторного уравнения

$$\vec{v}_{\text{абс1}} = \vec{v}_{\text{пер1}} + \vec{v}_{\text{отн1}}, \quad (1)$$

где $\vec{v}_{\text{абс1}}$, $\vec{v}_{\text{пер1}}$, $\vec{v}_{\text{отн1}}$ – абсолютная, переносная и относительная составляющие скорости куска соответственно на выходе из первого ряда.

В отличие от $v_{\text{пер1}}$ найти значение $v_{\text{отн1}}$ не представляется возможным. Можно лишь предположить, что $v_{\text{отн1}} \sim v_{\text{пер1}}$. Для придания большей определенности дальнейшим рассуждениям примем, что $v_{\text{отн1}} = v_{\text{пер1}}$.

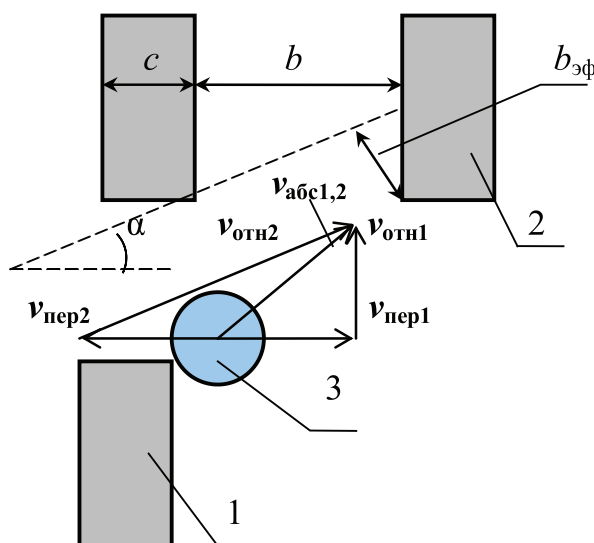


Рис. 1. Скорость куска материала на выходе из канала первого ряда активных элементов: 1, 2 – первый и второй ряды активных элементов; 3 – кусок материала

Следует подчеркнуть, что в начале первой стадии влияние на процесс такого фактора, как воздушный поток, несущественно и может во внимание не приниматься.

Второй ряд активных элементов (элементы 2) совершает движение, встречное элементам 1. Треугольник скоростей куска на входе в ряд элементов 2 также изображен на рис. 1 и является решением уравнения

$$\vec{v}_{\text{абс2}} = \vec{v}_{\text{абс1}} = \vec{v}_{\text{пер2}} + \vec{v}_{\text{отн2}}, \quad (2)$$

где $\vec{v}_{\text{абс2}}$, $\vec{v}_{\text{пер2}}$, $\vec{v}_{\text{отн2}}$ – абсолютная, переносная и относительная составляющие скорости куска соответственно на входе во второй ряд.

Обращает на себя внимание угол α между направлением $v_{\text{отн2}}$ и фронтом ряда элементов 2:

$$\alpha = \arctg \frac{v_{\text{отн1}}}{v_{\text{пер1}} + v_{\text{пер2}}}. \quad (3)$$

Пусть $v_{\text{пер1}} \approx v_{\text{пер2}}$. Тогда $\alpha \approx 26^\circ 34'$. Величина угла в данном случае играет чисто иллюстративную роль. Важно, что в канал

между двумя соседними элементами 2 может войти кусок с характерным размером

$$d_{\text{к}} \leq b \sin \alpha = b_{\text{эф}}, \quad (4)$$

где b – ширина канала; $b_{\text{эф}}$ – эффективная ширина канала.

Контакт куска с элементами 2 осуществляется по одному из трех сценариев (рис. 2):

1) вход в канал и удар о рабочую плоскость элемента при выполнении условия (4) (рис. 2, а);

2) удар о ребро элемента (рис. 2, б);

3) контакт куска с внутренней поверхностью элемента 2 и смещение его элементом 1 до удара о ребро следующего элемента 2 (рис. 2, в).

Необходимо сразу же указать, что сценарий 3 предполагает наличие у элементов 2 внутренних поверхностей, образующие которых близки по ориентации к дугам или хордам окружности.

Сценарий 1 представляет собой классический пример разрушения ударом о плоскую поверхность.

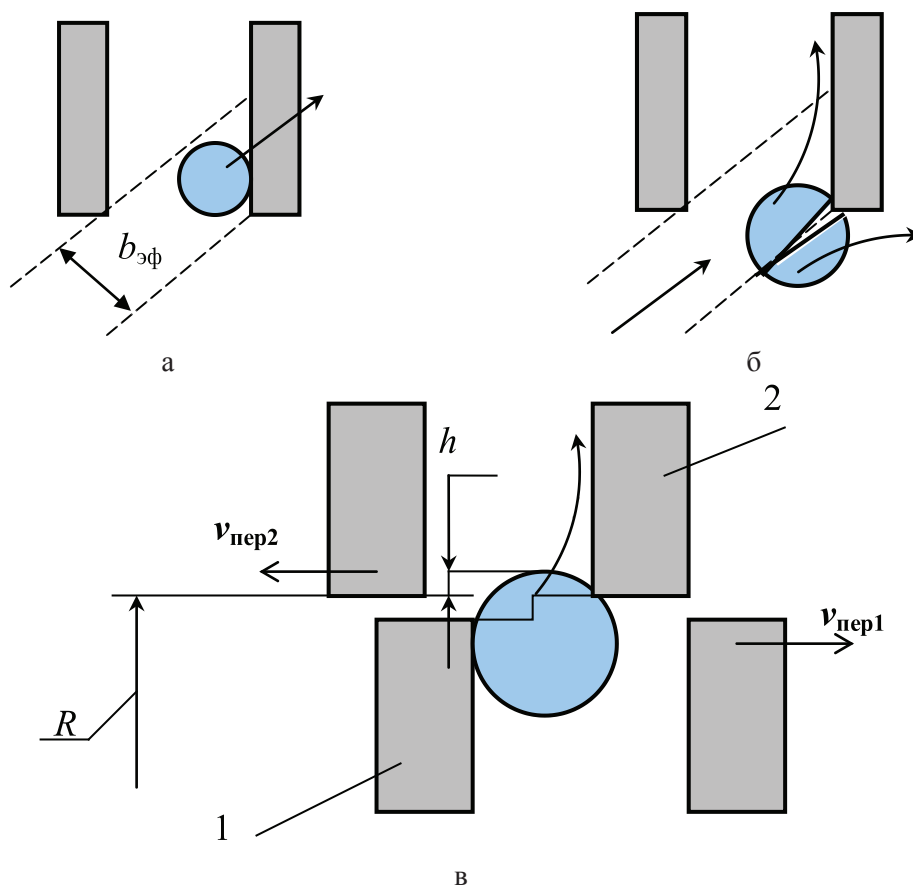


Рис. 2. Сценарии разрушения куска

По сценарию 2 происходит разрушение куска на осколки, часть из которых входит в канал, а остальные остаются под воздействием элемента 1 и перемещаются по внутренней поверхности элемента 2.

Очень интересен сценарий 3. В соответствии с ним кусок, проходя ширину b канала, углубляется в него под действием центробежной силы на расстояние h . Совместное воздействие элементов 1, 2 и центробежной силы приводит к разрушению куска, подобному срезу слоя толщиной h . Оценочные расчеты дают величину $h \sim 0,125b^2/R$, где R – радиус окружности расположения элементов 2 (рис. 2, в).

Вероятность реализации того или иного сценария зависит от целого ряда факторов. В конкретных случаях некоторые факторы становятся решающими. Так, значительное отклонение внутренних поверхностей элементов 2 от ориентации по окружности приводит к невозможности разрушения по сценарию 3. При измельчении сырья в виде песка с $d_k \ll b_{эф}$ существенно повышается вероятность сценария 1. Заметим также, что в результате разрушения по сценарию 2 осколки движутся по внутренней поверхно-

сти элемента 2 с последующим срезом по сценарию 3.

Если не учитывать сценарий 3, то сравнительную вероятность сценариев 1 и 2 при выполнении условия (4) можно оценить по соотношениям

$$p_1 = \frac{b}{b+c}; \quad (5)$$

$$p_2 = 1 - p_1, \quad (6)$$

где p_1, p_2 – вероятность сценария 1 и 2 соответственно; c – ширина элемента 2.

В общем случае осуществляются все сценарии, и на данном этапе исследования определить вклад каждого из них в процесс измельчения не представляется возможным.

Между рядом 2 и следующим за ним рядом 3 (на рис. 2 не показан) активных элементов осуществляется вторая стадия процесса – измельчение осколков на выходе первой стадии по описанным выше сценариям. Необходимо сделать следующие примечания:

– по отношению к осколкам, характерный размер которых $d_{оск}$ меньше зазора между рядами, сценарий 3 исключается;

$-d_{\text{оск}} < d_{\text{к}}$, поэтому ряд 3 выполняют с уменьшенной по сравнению с размером b шириной канала [7].

Наряду с крупными осколками при разрушении куска образуются мелкие, размер которых составляет доли миллиметра. На движение таких частиц начинает оказывать существенное влияние проходящий по каналам воздушный поток. Направления и величины скоростей, присущие частицам как результат разрушения куска, варьируются в широких пределах. Всегда есть некоторое количество частиц, действие на которые центробежных сил незначительно. В том случае, если скорость воздушного потока больше скорости витания частицы [4]

$$v_{\text{в}} = \rho \frac{gd_{\text{ч}}^2}{18\mu}, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $d_{\text{ч}}$ – характерный размер частицы, м ; μ – динамическая вязкость воздуха, $\text{кг}\cdot\text{с/м}^2$, то частица подхватывается потоком и выносится из канала.

Аналогична судьба частицы, выброшенной из канала непосредственно вследствие удара; эта частица также вовлекается в движение вместе с потоком воздуха. Данное явление называется зонной сепарацией.

Газовая динамика относится к числу наиболее сложных в описании и понимании областей физики. В настоящее время не существует математической модели, способной с приемлемой точностью установить

параметры потока вблизи твердых тел, совершающих скоростное вращательное движение. Так, все попытки получить числовые решения уравнений пограничного слоя на рабочих лопатках осевого или центробежного вентиляторов удовлетворительных результатов не дали [6]. Течения же в каналах ротора связаны не только с образованием на активных элементах пограничного слоя, но и с отрывом его от обтекаемых поверхностей, что вносит дополнительную неопределенность в рассуждения. Добавим, что до настоящего времени не проводились целенаправленные исследования ротора ИРВУ как центробежного вентилятора. По изложенным причинам на текущий момент возможна лишь попытка построения качественной картины аэродинамической обстановки внутри ротора.

На входе в канал ряда элементов 1 (рис. 3, а) абсолютная скорость воздуха направлена радиально. Проходя по каналу, поток приобретает переносную составляющую скорости. Относительная скорость воздуха $V_{\text{отн2}}$ (рис. 3, б) направлена под значительным углом атаки. Поток из канала ряда элементов 1 делится на две струи, одна из которых входит в канал элементов 2, а другая – в кольцевой зазор между рядами. На входе в канал элементов 2 поток отрывается от поверхности элемента с сопутствующим отрыву вихреобразованием. Пройдя через канал, поток выходит из него, имея переносную составляющую скорости $V_{\text{пер2}}$.

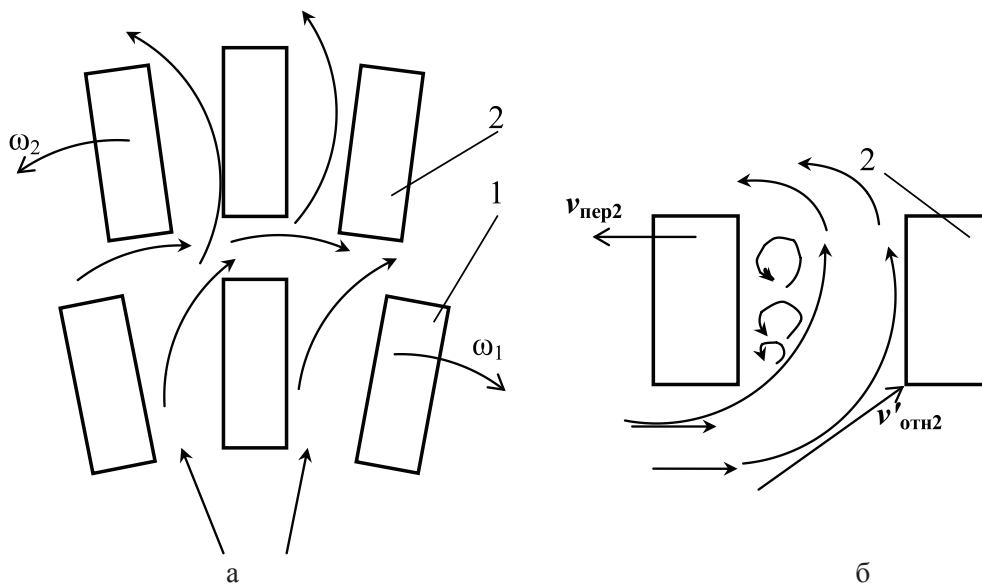


Рис. 3. Движение воздуха внутри ротора

Стационарная аэродинамическая обстановка в зоне рядов элементов 1 и 2 представляет собой струи, выходящие из каналов между элементами 1, кольцевой вихрь

в зазоре и струи, поступающие в каналы между элементами 2 (рис. 3, а).

Роль воздушного потока в процессе измельчения нельзя оценить однозначно.

Ротор ИРВУ по назначению – не центробежный вентилятор, поэтому он не обладает соответствующей вентилятору аэродинамической схемой. Создание им воздушного потока сопровождается большими по сравнению с вентилятором затратами энергии, иными словами, КПД ротора-вентилятора весьма низок. Кроме того, вращение ротора сопровождается шумообразованием, причем доминирующая частота звука прямо связана с частотой вращения.

О такой функции воздушного потока, как зонная сепарация, было сказано выше. Интенсивность потока положительно влияет на производительность ИРВУ. Следует упомянуть и то, что именно воздухом осуществляется очистка каналов и зазоров ротора от остатков продукта измельчения.

Нет также четкого ответа на вопрос, как происходит дробление частицы, переносимой воздушным потоком. Существует предположение о том, что сценарии разрушения куска по рис. 2 на частицу не распространя-

ются. Очевидно, сценарий 3 исключается, т.к. $d_{\text{ч}}$ значительно меньше зазора между рядами. В том случае, когда $d_{\text{ч}} \sim r_{\text{к}}$, где $r_{\text{к}}$ – радиус скругления кромки активного элемента, резко снижается вероятность сценария 2. При набегании струи на поверхность возникает пристеночное течение, выступающее в качестве своеобразного экрана и препятствующее удару частицы по сценарию 1. Возможно, таким образом, прохождение взвешенной в потоке частицы через каналы ротора либо без вхождения в контакт с активными элементами, либо с контактом, но без разрушения. Вероятно, именно этим объясняется наличие в продукте крупных фракций, которого не удастся избежать ни повышением частоты вращения, ни уменьшением ширины каналов.

Скорость витания (формула (7)) зависит от плотности частицы. Меньшая плотность обуславливает перенос воздушным потоком частиц с большим $d_{\text{ч}}$. Результаты расчетов по формуле (7) для частиц различных материалов сведены в таблице.

Зависимость скорости витания (м/с) от плотности и диаметра частицы

Материалы	Плотность, кг/м ³	Диаметры частиц, мкм		
		100	200	400
Полимеры	1000	0,297	1,19	4,75
Уголь	800–1850	0,237–0,549	0,949–2,195	3,79–8,78
Кварц	2500–2800	0,742–0,831	2,968–3,324	11,87–13,30
Охра	3500	1,04	4,152	16,61

Таким образом, есть основание предположить, что интенсивность потока обуславливает различную тонины помола материалов разной плотности.

Обзор факторов влияния воздушного потока на рабочие процессы в ИРВУ приводит к выводу о целесообразности оптимизации производительности ротора-вентилятора по критериям энергопотребления и достижения заданной тонины помола.

Список литературы

1. Ахлюстина Н.В., Таугер В.М. Физические процессы при ударном разрушении материалов измельчителе с ротором встречного вращения // Изв. вузов. Горный журнал. – 2007. – № 3. – С. 113–117.
2. Гарабазхиу А.А. Математическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице // Химическая промышленность. 2003. – № 6. – С. 15–30.
3. Ляпцев С.А., Потапов В.Я., Потапов В.В., Матвеев Д.В., Феклистов Ю.Г. Теоретический анализ движения и удара частицы обогащаемого материала о наклонную плоскость // Изв. вузов. Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 110–113.
4. Самсонов В.Т. Универсальный циклон // http://sam-vl.narod.ru/Universal_C/Universal_Cw.htm (дата обращения 14.03.13).
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
6. Таугер В.М., Холодников Ю.В. Способ визуализации потока в осевом вентиляторе при его работе на неустойчивом режиме // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – № 7. – С. 89–91.
7. Тумашев А.С., Аввакумов Е.Г. Центробежно-струйная мельница // Патент РФ № 2381070. 2010. Бюл. № 23.

References

1. Ahlyustina N.V., Tauger V.M. Fizicheskie protsessy pri udarnom razrushenii materialov izmelchitele s rotorom vstrechnogo vrascheniya // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 2007. no. 3. pp. 113–117.
2. Garabazhiu A.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessov izmelcheniya i klassifikatsii syipuchih materialov v rotorno-tsentrobeznoy melnitse // Himicheskaya promyshlennost. 2003. no. 6. pp. 15–30.
3. Lyaptsev S.A., Potapov V.Ya., Potapov V.V., Matveev D.V., Feklistov Yu.G. Teoreticheskiy analiz dvizheniya i udara chastitsy obogaschaemogo materiala o naklonnyuyu ploskost // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 2007. no. 1. pp. 110–113.
4. Samsonov V.T. Universalnyy tsiklon // http://sam-vl.narod.ru/Universal_C/Universal_Cw.htm (data obrascheniya 14.03.13).
5. Sidenko P.M. Izmelchenie v himicheskoy promyshlennosti. 2-e izd., pererab. M.: Himiya, 1977. 368 p.
6. Tauger V.M., Holodnikov Yu.V. Sposob vizualizatsii potoka v osevom ventilyatore pri ego rabote na neustoychivom rezhime // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 1984. no. 7. pp. 89–91.
7. Tumashev A.S., Avvakumov E.G. Tsentrobezno-struynaya melnitsa // Patent RF no.2381070. 2010. Byul. no. 23.

Рецензенты:

Герц Э.Ф., д.т.н., профессор, директор института лесопромышленного бизнеса и дорожного строительства, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург;

Добychин И.А., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ЗАО НПЦ «ТОРМО», г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 15.01.2014.