

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Гарабжук А. А., Мурог В. Ю.

Белорусский государственный технологический университет

Рассмотрены конструктивные особенности и принцип действия энергосберегающей роторно-центробежной мельницы с непрерывной проточной классификацией готового продукта. Предложена физическая модель процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в данной мельнице.

Процесс измельчения является весьма распространённым и встречается практически в любой отрасли производственной деятельности. Наиболее широкое применение процессы измельчения находят в горнорудной промышленности при переработке полезных ископаемых, в химической промышленности при производстве минеральных удобрений, красителей и многих других видов продукции, в промышленности строительных материалов (цемента, извести, гипса), при изготовлении керамических, силикатных, бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Широкое применение процессы измельчения нашли также в сельскохозяйственном производстве и пищевой промышленности, например, при изготовлении муки, крупы, комбикормов [1, 2, 3].

Однако процесс тонкого измельчения является весьма энергоёмким, т. е. требует больших энергетических затрат и сопряжен с безвозвратной потерей металла из-за износа рабочих элементов измельчителей. Так в ряде работ [4, 5, 6] отмечается, что в настоящее время на измельчение затрачивается около 5 - 10 % производимой в мире электроэнергии и несколько миллионов тонн высококачественной стали. В той же горнорудной промышленности на измельчение расходуется около 40 % от всей используемой энергии, в комбикормовой - до 70 %, в мукомольной - около 50 %. Мощность привода шаровых барабанных мельниц в горнорудной промышленности и цементном производстве достигает 8000 кВт.

Большие энергетические затраты, сопровождающие процесс тонкого измельчения, объясняются не только большими объемами перерабатываемых материалов, но и тем, что используемые для измель-

чения машины, особенно для помола, отличаются чрезвычайно низкой эффективностью, и КПД их составляет, в лучшем случае, несколько процентов [3]. Поэтому многие исследователи в настоящее время занимаются разработкой новых более эффективных машин для измельчения материалов. Например, все более широкое применение находят среднеходные мельницы, у которых расход электроэнергии на единицу измельченного материала ниже почти в 2 раза по сравнению с барабанными мельницами [7].

В настоящее время наиболее эффективными машинами для тонкого помола сыпучих материалов являются измельчители, реализующие высокоскоростное ударное нагружение. Высокая скорость деформирования материала в подобных измельчителях приводит к хрупкому разрушению даже пластичных материалов, которое характеризуется малой величиной пластической деформации, большой скоростью распределения трещин и малой энергией, необходимой для их разрушения. К машинам данного типа относятся мельницы ударно-отражательного действия, имеющие целый ряд преимуществ перед аналогичными измельчителями других типов: низкие удельные энергозатраты, высокая тонина помола, небольшие габаритные размеры и т. д. [5, 8, 9].

Однако, не смотря на все это, современные измельчители ударного действия имеют и определенные недостатки, которые несколько снижают эффективность их работы. Наряду с высоким износом рабочих элементов (молотков, била, отбойных плит и т. д.) в данных измельчителях большая часть подводимой энергии расходуется на измельчение материала именно за счет истирания, а не удара, что приводит к излишнему росту удельных энер-

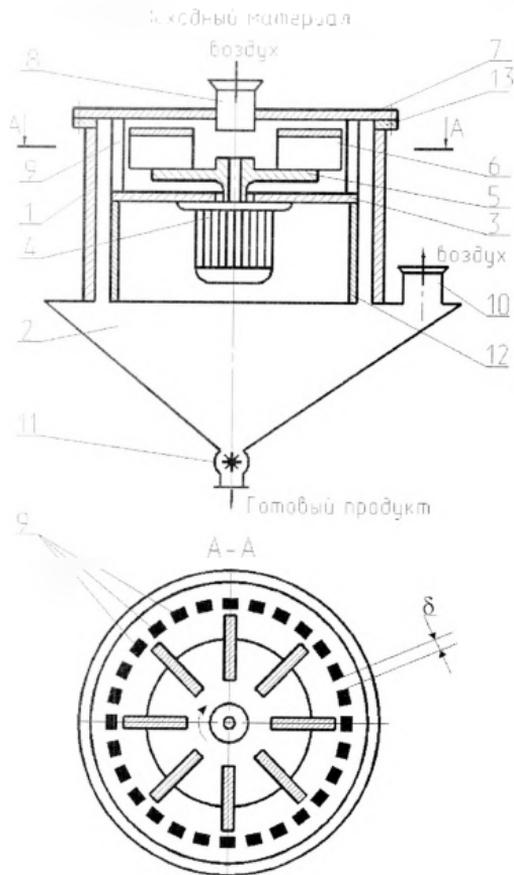


Рис. 1. Роторно-центробежная мельница с непрерывной проточной классификацией готового продукта:
 1 - корпус; 2 - приемный бункер; 3 - нижняя плита; 4 - электродвигатель; 5 - диск; 6 - лопасти; 7 - крышка; 8 - питательный патрубок; 9 - отражательные стержни; 10 - патрубок удаления воздуха; 11 - патрубок выгрузки готового продукта; 12 - внутренняя цилиндрическая обечайка; 13 - фланец; d - ширина зазора между отражательными стержнями 9 мельницы, м.

гозатрат на тонну готового продукта. Так, например, по данным С. П. Джинджихадзе [10] в молотковой дробилке при скорости вращения молотков 110 м/с, на измельчение зерна пшеницы ударом расходуется только 16,9 % от всей подводимой энергии, а на измельчение истиранием - 83,1 %. На наш взгляд, одним из путей решения данной проблемы является реализация непрерывного и высокоэффективного удаления из зоны измельчения частиц материала, достигших требуемой тонины помола. В этом случае значительно меньше частиц будет подвергаться безрезультатному нагружению, что в конечном итоге обеспечит снижение энергозатрат на трение частиц между собой и исключит их переизмельчение.

В настоящее время на кафедре "Машины и аппараты химических и силикатных производств" Белорусского государственного технологического университета разработано около десятка новых конструкций роторно-центробежных мельниц, где, в результате комбинирования процессов высокоскоростного ударного измельчения и непрерывной проточной классификации тонко помолотого материала, достигается высокое качество помола готового продукта при минимальных энергозатратах.

Одна из таких роторно-центробежных мельниц с непрерывной проточной классификацией готового продукта, разработанная при непосредственном участии авторов статьи, представлена на рисунке 1 [11].

Данная мельница состоит из цилиндрического корпуса 1, нижняя часть которого жестко соединена посредством болтов с приемным бункером 2. К нижней плите 3 корпуса 1 с помощью болтов крепится электродвигатель 4, вертикальный вал которого проходит внутри рабочей камеры мельницы. Внутри корпуса 1, на валу электродвигателя 4, с помощью ступицы установлен ротор, состоящий из диска 5 и радиальных рабочих лопастей 6. Конструкция ротора - сварная. Сверху к корпусу 1 приварен фланец 13, к которому при помощи болтов крепится крышка 7 с питательным патрубком 8. Внутри корпуса 1, вдоль цилиндрической обечайки, по окружности жестко закреплены отражательные стержни 9, изготовленные из износостойкой стали. В зависимости от требуемой тонины помола, стержни 9 устанавливаются друг относительно друга с определенным зазором $d = (1 - 5) \cdot 10^{-3}$ м, что подразумевает под собой наличие необходимого количества наборов стержней 9 с различными размерами выступов. К наружной поверхности плиты 3 снизу приварена внутренняя цилиндрическая обечайка 12, жестко соединенная по средствам болтов с приемным бункером 2. Таким образом, ци-

линдрическая обечайка корпуса 1 и внутренняя обечайка 12 образуют кольцевой канал, по которому осуществляется выгрузка из рабочей камеры мельницы в приемный бункер 2 тонкоизмельченного материала. Бункер 2 имеет коническую форму и заканчивается внизу патрубком 11 с затвором для выгрузки готового продукта. Для удаления воздуха из приемного бункера 2 в верхней его части имеется специальный патрубок 10, к которому подводится фильтр.

При работе мельницы электродвигатель 4 приводит во вращение роторный диск 5 с окружной скоростью по концам лопастей 6 не менее 50 м/с. Подлежащий измельчению материал через питательный патрубок 8 равномерно подается в центральную часть мельницы на роторный диск 5. За счет центробежной силы материал отбрасывается на периферию. Частицы материала равномерно очень тонким слоем распределяются по лопастям 6 и, срываясь с них, соударяются с отражательными стержнями 9. Когда передняя часть частицы резко останавливается отбойной поверхностью отражательного стержня 9, силы инерции развивают внутри частицы значительные напряжения, которые превышают механическое сопротивление и ее передняя часть превращается в тонкодисперсный размолотый продукт. После этого от точки контакта вдоль поверхностей наименьшего сопротивления немедленно начинают образовываться трещины, которые распространяются к задней части частицы и приводят к ее полному разрушению. Согласно исследованиям А. А. Глебова [12], продолжительность полного разрушения частицы материала может изменяться от 10^4 до 10^6 секунды в зависимости от прочностных характеристик измельчаемого материала и скорости вращения ротора мельницы.

В процессе измельчения мельница одновременно работает и как вентилятор. В рабочую камеру воздух поступает за счет вращения ротора через питательный патрубок 8. Крупные частицы материала после удара об отражательные стержни 9 отскакивают назад и попадают под удар вращающихся лопастей 6 или частиц материала скользящих с ротора, что в свою очередь приводит к их полному разрушению. Более мелкие же частицы подхватываются воздушным потоком и начинают вращаться внутри рабочей камеры вдоль стержней 9, многократно ударяясь об них. Таким образом, в данной конструкции роторно-центробежной мельницы процесс измельчения осуществляется как при ударе рабочих лопастей 6 о частицы материала, так и при ударе частиц об отражательные стержни 9 или же в результате соударения частиц материала

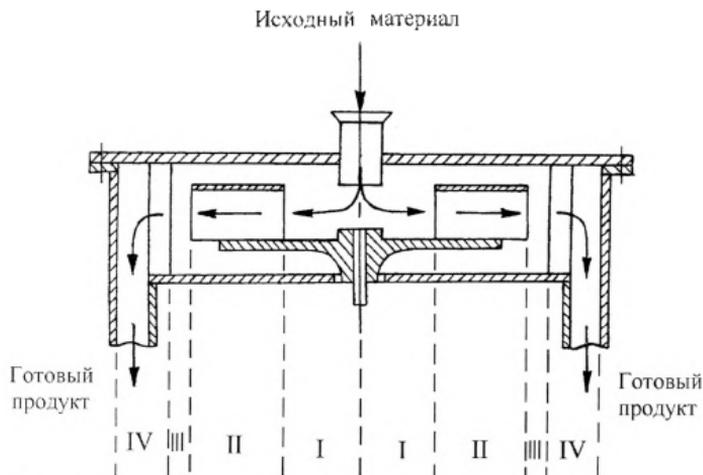


Рис. 2. Условная разбивка на зоны помольной камеры роторно-центробежной мельницы: I - зона подачи и распределения материала (предлопастное пространство); II - зона разгона (межлопастное пространство); III - зона измельчения; IV - зона классификации.

между собой. За счет центробежной силы у поверхности стержней 9 создается зона повышенного давления воздуха. Это способствует тому, что воздух вместе с частицами тонкодисперсного материала беспрепятственно проходит через щели между стержнями 9 в кольцевой канал и далее, двигаясь вниз, поступает в приемный бункер 2. Таким образом, в данной конструкции роторно-центробежной мельницы осуществляется непрерывный отвод тонкодисперсного материала из зоны помола. После этого измельченный материал осаждается в бункере 2, а запыленный воздушный поток через патрубок 10 поступает в фильтр на очистку.

Значительное снижение энергозатрат и повышение качества помола сыпучих материалов в новой конструкции роторно-центробежной мельницы может быть достигнуто за счет равномерной и организованной подачи в рабочую зону измельчителя исходного материала, обеспечения высокой частоты ударного взаимодействия частиц материала с отбойными элементами мельницы, а также комбинирования в ней процессов высокоскоростного ударного измельчения и непрерывной проточной классификации измельченного материала, с

последующим возвратом крупной фракции материала на домол.

Физическая модель процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице

Широкое внедрение в промышленную практику новых измельчительей может быть реализовано при наличии инженерной методики расчета их основных конструктивных и технологических параметров, а также глубокими теоретическими и экспериментальными исследованиями протекающих в них процессов.

Для проведения всесторонних теоретических исследований процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице необходимо:

1) разработать детальную физическую модель выше перечисленных процессов или же, говоря другими словами, необходимо провести последовательный поэтапный анализ характера движения и физических превращений одиночных частиц из-

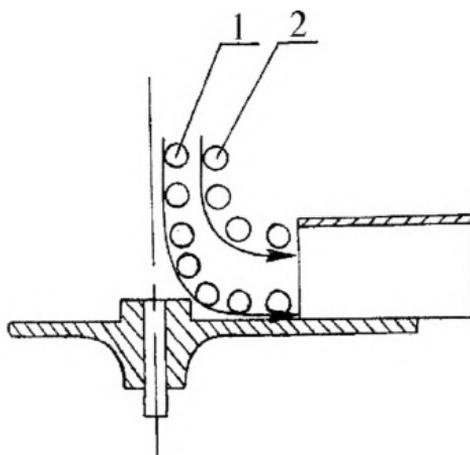


Рис. 3. Характер движения частиц измельчаемого материала в предлопастном пространстве роторно-центробежной мельницы (зона I): 1 - Движение частиц материала по роторному диску; 2 - движение частиц материала во взвешенном состоянии (полет).

мельчаемого материала в помошной камере мельницы.

2) провести поэтапное математическое моделирование аэродинамики движения воздушного потока и одиночных частиц измельчаемого материала в помошной камере мельницы.

При разработке физической модели процессов измельчения и классификации сыпучих материалов, в помошной камере роторно-центробежной мельницы можно выделить следующие четыре зоны (рисунк 2):

- I - зона подачи и распределения материала (предлопастное пространство);
- II - зона разгона (межлопастное пространство);
- III - зона измельчения;
- IV - зона классификации.

Общая взаимосвязанная картина движения воздушного потока и частиц измельчаемого материала в помошной камере мельницы достигается за счет постановки соответствующих условий на границах между зонами.

Рассмотрим по отдельности каждую из зон.

1. Зона подачи и распределения материала (рисунк 2) представляет собой кольцевой канал, ограниченный осью вращения ротора и внутренней

кромкой рабочих лопастей мельницы. Воздух и частицы исходного материала поступают в зону I в осевом направлении через питательный патрубок, расположенный в крышке мельницы. Двигаясь вниз соосно вращающемуся ротору мельницы, воздушный поток, также, как и в центробежных вентиляторах [13 - 15], изменяет направление своего движения с осевого на радиальное. При этом частицы исходного материала, падающие на роторный диск под действием силы тяжести, подхватываются воздушным потоком и начинают двигаться вместе с ним в радиальном направлении в сторону рабочих лопастей.

Характер движения частиц измельчаемого материала на участке от оси вращения ротора и до внутренней кромки рабочих лопастей мельницы может быть двух видов (рисунк 3):

- 1) движение частиц материала по роторному диску;
- 2) движение частиц материала во взвешенном состоянии (полет).

Различный характер движения частиц измельчаемого материала на входе в межлопастное пространство ротора мельницы зависит в первую очередь от величины скорости воздушного потока на

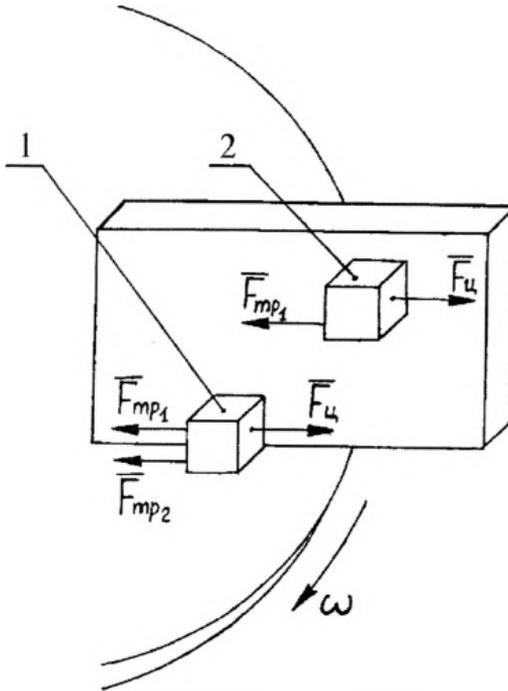


Рис. 4. Характер движения частиц измельчаемого материала в межлопастном пространстве роторно-центробежной мельницы (зона II):
 1 - движение частицы материала по роторному диску с одновременным трением о поверхность рабочей лопасти ($F_{ц} > (F_{mp} + F_{tr})$);
 2 - движение частицы материала вдоль поверхности рабочей лопасти ротора ($F_{ц} > F_{tr}$)

границе двух зон I-й и II-й, а также от размеров ротора и от величины скорости вращения частиц исходного материала. Если абсолютная скорость воздуха ($C_{в}$) на входе в межлопастное пространство будет больше некоторой оптимальной величины ($C_{оп}$), определяемой исходя из конкретных размеров ротора и скорости вращения частиц исходного материала, то в пределах зоны I частицы будут двигаться во взвешенном состоянии, т. е. лететь (поз. 2, рисунок 3). Если же скорость воздуха ($C_{в}$) будет меньше величины ($C_{оп}$), то в пределах зоны I час-

тицы материала будут двигаться по роторному диску мельницы (поз. 1, рисунок 3).

Наиболее предпочтительным из представленных на рисунке 3 режимов движения является тот, при котором в пределах зоны I обеспечивается движение частиц измельчаемого материала во взвешенном состоянии (поз. 2, рисунок 3). Это объясняется тем, что в данном случае на движущиеся частицы материала оказывает влияние (препятствует их движению) только сила аэродинамического сопротивления воздушного потока. Трение же частиц

о рабочем элементе ротора (в частности об диск) полностью отсутствует. Таким образом, на прилипающие частицам исходного материала критической скорости ($U_{кр}$), необходимой для их полного разрушения, затрачивается несколько меньшее количество энергии, чем в случае движения частиц материала по роторному диску. В конечном итоге это приводит к определенному снижению энергозатрат в процессе измельчения и классификации данного материала в роторно-центробежной мельнице.

II. Зона разгона (рисунок 2) представляет собой кольцевой канал, ограниченный внутренней и внешней кромками рабочих лопастей мельницы, и разделенный последними на равные секторные участки.

Характер движения частиц измельчаемого материала в пределах межлопастного пространства роторно-центробежной мельницы (рисунок 4) зависит, как и в случае I-й зоны, от величины скорости воздуха на границе двух зон I-й и II-й. Если абсолютная скорость воздуха ($C_{аб}$) на входе в межлопастное пространство будет больше некоторой оптимальной величины ($C_{опт}$), то частицы материала в пределах зоны II будут двигаться вдоль поверхности рабочих лопастей ротора (поз. 2, рисунок 4). Если же скорость ($C_{аб}$) будет меньше величины ($C_{опт}$), то в пределах зоны II частицы материала будут двигаться по роторному диску с одновременным трением о поверхность рабочих лопастей мельницы (поз. 1, рисунок 4).

Наиболее предпочтительным режимом движения частиц измельчаемого материала в пределах межлопастного пространства роторно-центробежной мельницы является тот, при котором обеспечивается движение частиц вдоль поверхности рабочих лопастей (поз. 2, рисунок 4). Это объясняется тем, что в данном случае, без учета всех прочих сил (силы аэродинамического сопротивления воздуха, кориолисовой силы, силы тяжести и нормальной силы реакции), основное условие движения частиц материала будет выглядеть следующим образом:

$$\overline{F}_a > \overline{F}_{тр} \quad (1)$$

где \overline{F}_a - центробежная сила

$\overline{F}_{тр}$ - сила трения частиц материала о поверхность рабочих лопастей ротора.

Для случая, изображенного на поз. 1 рисунка 4, основное условие движения частиц материала будет выглядеть иначе:

$$\overline{F}_a > (\overline{F}_{тр} + \overline{F}_{пр}) \quad (2)$$

где $\overline{F}_{пр}$ - сила трения частицы материала о поверхность роторного диска.

Таким образом, анализируя зависимости (1) и (2), можно отметить, что в случае 2 рисунка 4 частицам измельчаемого материала необходимо сообщить несколько меньшее количество энергии для того, чтобы они могли с наименьшими потерями преодолеть межлопастное пространство роторно-центробежной мельницы и достигнуть критической скорости разрушения ($U_{кр}$), нежели в случае 1 рисунка 4.

III. Зона измельчения (рисунок 2) представляет собой кольцевой канал, ограниченный внешней кромкой рабочих лопастей ротора и отбойной поверхностью отражательных стержней мельницы.

Процесс измельчения в данной конструкции роторно-центробежной мельницы (рисунок 1) осуществляется за счет удара частиц исходного материала об отбойную поверхность отражательных стержней. При этом радиальные лопасти ротора выполняют лишь разгонную функцию.

Анализируя особенности механизма измельчения твердых частиц материала в мельницах центробежно-ударного действия, а также в роторных и молотковых мельницах-дробилках [16 - 20], применительно к роторно-центробежной мельнице с непрерывной проточной классификацией готового продукта, можно отметить следующие.

Характер разрушения частиц исходного материала при ударе об отражательную поверхность роторно-центробежной мельницы может быть двух видов (рисунок 5):

а) полное разрушение (прямой удар, угол attack частицы $\alpha = 90^\circ$);

б) частичное разрушение (косой удар, $\alpha < 90^\circ$); и зависит от большого количества различных факторов, основными из которых являются:

1) величина абсолютной скорости удара (нагрузки) частиц материала (U) об отражательную поверхность мельницы;

2) величина критической скорости разрушения ($U_{кр}$) частиц данного материала;

3) траектория движения частиц исходного материала в пределах зоны измельчения;

4) угол установки отражательных стержней по отношению к радиусу мельницы.

Наиболее предпочтительным видом разрушения частиц исходного материала в помольной камере вихревой мельницы является разрушение посредством высокоскоростного центрального (прямого) удара ($\alpha = 90^\circ$) об отражательную поверхность измельчителя [21]. В данном случае кинетическая энергия частиц материала используется для

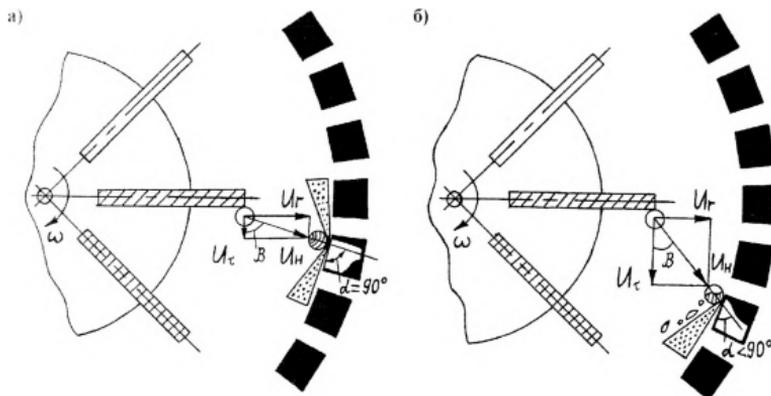


Рис. 5. Характер разрушения отдельных частиц материала при ударе об отрагательную поверхность роторно-центробежной мельницы (зона III): а) - полное разрушение (прямой удар, $\alpha = 90^\circ$); б) - частичное разрушение (косой удар, $\alpha < 90^\circ$)

разрушения с минимальными потерями. А больший запас энергии, как известно, ведет к образованию большей поверхности разрушения и, как следствие, в конечном итоге возрастает количество тонкодисперсного материала в общей массе готового продукта. Таким образом, при прямом ударе ($\alpha = 90^\circ$), в результате более тонкого помола, значительно снижается количество ricochetирующих от отрагательной поверхности на рабочие лопасти мельницы крупных осколков измельчаемого материала, что в свою очередь приводит к определенному увеличению срока службы рабочих элементов ротора и снижению капитальных затрат на их замену или восстановление.

IV. Зона классификации (рисунк 2) представляет собой кольцевой канал ограниченный с одной стороны отбойной поверхностью отрагательных стержней, а с другой — цилиндрической обечайкой корпуса мельницы. Как уже отмечалось ранее, в новой конструкции роторно-центробежной мельницы (рисунк 1) одновременно с помолом осуществляется также процесс непрерывной проточной классификации измельченных частиц материала. При этом процесс классификации затрагивает зоны III и IV в помольной камере мельницы и осуществляется следующим образом.

После удара об отрагательную поверхность мельницы крупные частицы измельченного мате-

риала отскакивают назад и попадают под удар вращающихся лопастей ротора или частиц материала сходящихся с ротора, что в свою очередь приводит к их полному разрушению. Тонкодисперсные же частицы помолотого материала подхватываются воздушным потоком и начинают вращаться внутри рабочей камеры мельницы вдоль ряда, жестко закрепленных по окружности с определенным зазором (δ , м) друг относительно друга, отрагательных стержней, многократно ударяясь об них. При этом, согласно исследованиям А. Н. Штыма [22], М. А. Гольцштика [23 - 25] и В. Б. Каспрука [26], траектория движущаяся частиц измельченного материала вдоль ряда отрагательных стержней представляет собой скачкообразную нисходящую спираль (рисунк б). За счет центробежной силы у поверхности отрагательных стержней создается зона повышенного давления воздуха. Это способствует тому, что воздух вместе с частицами тонкодисперсного материала, после некоторого движения вдоль ряда отрагательных стержней, беспрепятственно проходит через зазоры (δ , м) между ними и выводится из мельницы как готовый продукт. Ввиду того, что тангенциальная скорость воздуха и измельченных частиц материала внутри рабочей камеры у поверхности отрагательных стержней значительно выше, нежели их радиальная скорость в зазорах (δ , м), то, естественно, что ради-

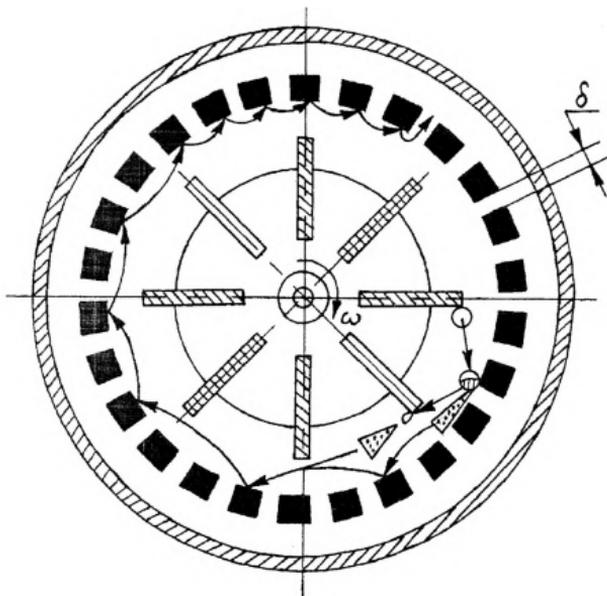


Рис. 6. Процесс классификации измельченных частиц материала в помольной камере роторно-центробежной мельницы (зоны III и IV).

лальный поток воздуха будет подхватывать только тонкодисперсные частицы материала, размер которых намного меньше размера самих зазоров (δ , м). Следовательно, при таких условиях исключается забивка зазоров (δ , м) между отражательными стержнями и будет обеспечиваться высокая степень помола частиц исходного материала в данной конструкции роторно-центробежной мельницы.

Эффективность процесса классификации частиц измельченного материала в помольной камере роторно-центробежной мельницы зависит от следующих факторов:

1) от тонины помола частиц исходного материала и, как следствие, от величины абсолютной скорости удара (погружения) частиц материала ($U_{\text{п}}$) по отражательную поверхность мельницы;

2) от формы, количества и размера зазоров (δ , м) между отражательными стержнями мельницы;

3) от величины тангенциальной скорости воздуха внутри помольной камеры мельницы у поверхности отражательных стержней;

4) от величины радиальной скорости воздуха в зазорах (δ , м) между отражательными стержнями мельницы.

Определить степень влияния выше перечисленных факторов на эффективность процесса классификации частиц измельченного материала в помольной камере роторно-центробежной мельницы представляется возможным лишь при помощи математического моделирования данного процесса.

Условные обозначения

- δ - ширина зазора между отражательными стержнями мельницы, м;
- C_{12} - абсолютная скорость движения воздушного потока на входе в межлопастное пространство мельницы, м/с;

- $C_{опт}$ - оптимальная скорость движения воздушного потока на входе в межлопастное пространство мельницы, м/с;
 $U_{кр}$ - критическая скорость движения частицы материала в кольцевом зазоре между выходной хромой рабочих лопастей и отражательными стержнями мельницы, м/с;
 $U_{аб}$ - абсолютной скорости удара (нагружения) частицы материала об отражательную поверхность мельницы, м/с;
 $\overline{F}_{сб}$ - центробежная сила, Н;
 $\overline{F}_{трп}$ - сила трения частицы материала о поверхность рабочих лопастей ротора, Н;
 $\overline{F}_{трд}$ - сила трения частицы материала о поверхность роторного диска, Н;
 α - угол атаки частицы материала, град.;

Библиография

1. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. // М., Химия, 1977, 382 с.
2. Коцолов А. Н., Глебов Л. А. Производство комбикормов и кормовых смесей. // М., Агропромиздат, 1986, 176 с.
3. Сорго Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. // М., Недра, 1985, 322 с.
4. Гьюо Руже. Проблема измельчения материалов и ее развитие. // М., Стройиздат, 1964, 225 с.
5. Труды Европейского совещания по измельчению. / Сборник статей. - М., Стройиздат, 1966, 592 с.
6. Акунов В. И. Современное состояние и перспективы развития помольной техники. // Цемент, 1986, № 7, с. 13-15.
7. Лелин Л. А., Федятин К. Ф. Среднеходные и тихоходные мельницы. // М., Энергия, 1981, 357 с.
8. Опыт применения центробежно-ударных измельчителей. // Обзорная информация. Центральный научно-исследовательский институт информатики и технико-экономических исследований черной металлургии. - М., 1991, 25 с. (Черная металлургия. Сер. 4. Вып. 2).
9. Пулин К. I. Определение параметров и производительности роторных мельниц интенсифицирующего действия. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.16. - М.: МАДИ, 1994.
10. Джинджихадзе С. П. Исследование энергоёмкости процесса дробления фуражного зерна в молотковых дробилках. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.16. - Тбилиси: ТПИ, 1965.

11. Патент РФ № 4707. Мельница, Левданский А. Э., Гарабажиу А. А., Левданский Э. И., Левданский С. Э.
12. Глебов Л. А. Повышение эффективности измельчения компонентов комбикормов. // Обзорная информация. Центральный научно-исследовательский институт информатики и технико-экономических исследований. - М., 1984, 44 с. (Сер. Комбикормовая пром-сть).
13. Ильясов А. Е. Разработка и исследование центростремительного вентилятора. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.13. - Харьков, ХарПИ, 1989.
14. Центробежные вентиляторы. Под ред. Т. С. Соломаховой. // М., Машиностроение, 1975, 416 с.
15. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. // М., Энергоатомиздат, 1984, 380 с.
16. Клушанцев Б. В., Косаров А. И., Муйземнек Ю. А. Дробилки. Конструкции, расчет, особенности эксплуатации. // М., Машиностроение, 1990, 319 с.
17. Бауман В. А. Роторные дробилки. // М., Машиностроение, 1973, 272 с.
18. Барабашкин В. П. Молотковые и роторные дробилки. // М., Недра, 1973, 388 с.
19. Демидов А. Р., Чирков С. Е. Измельчающие машины ударного действия. // М., Машиностроение, 1969, 72 с.
20. Осокин В. П. Молотковые мельницы. // М., Энергия, 1980, 186 с.
21. Клейс И. Р., Узумыйсь Х. Х. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. // М., Машиностроение, 1986, 160 с.
22. Штым А. Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер. // Владивосток, Издательство дальневосточного университета, 1985, 200 с.
23. Гольдштик М. А., Леонтьев А. К., Палева И. И. Движение мелких частиц в закрученном потоке. // Инженерно-физический журнал, 1960, № 2, с. 17-24.
24. Гольдштик М. А., Сорокин В. Н. О движении частицы в вихревой камере. // Журнал прикладной механики и теплотехнической физики, 1968, № 6, с. 149-152.
25. Аман С. О., Гольдштик М. А., Лихачев О. А. Скачкообразное движение частиц в вихревой камере. // Инженерно-физический журнал, 1985, Т.48, № 5, с. 726-733.
26. Каспрук В. Б. Повышение эффективности пылеулавливания в аппаратах со встречными закрученными потоками. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.13. - Львов: Гос. ун-т "Львовська політехніка", 1988.