

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79

^{1,*}Качаев А.Е., ²Севостьянов В.С., ²Чемеричко Г.И., ²Орехова Т.Н.¹Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: doctor_cement@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЕ ДЕЗИНТЕГРАТОРА

Аннотация. Рациональное управление режимами работы оборудования в производстве строительных материалов возможно только в случае математического описания различных технологических процессов. Последовательность расчетных методик определения конструктивно-технологических параметров помольного оборудования позволяет численно представить результаты расчетов рациональных режимов его работы. В исследовании представлено математическое описание динамики двухфазного потока внутри помольной камеры дезинтегратора, с помощью которого можно определить скоростные характеристики режимов его работы для материалов с различными физико-механическими свойствами. Установлен характер изменения тангенциальных составляющих скоростей двухфазного потока: определен диапазон текущего радиуса помольной камеры R_i , при котором продолжается рост радиальных составляющих скоростей несущего потока и частиц измельчаемого материала. В результате математического моделирования подтверждено, что с ростом концентрации пылевидных частиц в увеличивающемся объеме помольной камеры происходит снижение значения тангенциальной составляющей скорости динамического двухфазного потока по отношению к максимальным параметрам при $R_i = 0,15$ м в среднем на 15,5 %. Определено, что максимальные значения скоростей для тангенциальной составляющей находятся в пределе по $R_i = 0,1-0,15$ м и составляют для воздушной среды 131 м/с, а для средневзвешенной частицы с $d_{cp} = 40$ мкм – 127,5 м/с. В процессе разработки математического описания установлено, что в диапазоне $R_i = 0,15-0,3$ м прирост радиальных составляющих скоростей воздушной несущей среды и средневзвешенного потока частиц составляет около 14,5 %, что, в свою очередь, свидетельствует о росте кинетической энергии измельчаемых частиц при движении динамического двухфазного потока от центра к периферии помольной камеры дезинтегратора.

Ключевые слова: дезинтегратор, двухфазный поток, частица, радиальная скорость, тангенциальная скорость, динамика частиц.

Введение. Технологические процессы в промышленности строительных материалов продолжают совершенствоваться [1, 2], формируют задачи для удовлетворения требований к энергоэффективности промышленного оборудования. В свою очередь, современные достижения строительного материаловедения требуют адаптации применяемого технологического оборудования к выпуску новых конкурентоспособных материалов, способствуют развитию гибких и универсальных технологических комбинаций для малотоннажных линий с различным технологическим оснащением [3].

Многообразие механических способов дезинтеграции сырьевых материалов позволяет получать дисперсные порошки с заданным гранулометрическим составом, определяет конструктивно-технологические принципы работы измельчителей и формирует подход к реализации энергоэффективности процесса измельчения в промышленности. Множество используемых принципов механического воздействия на измельчаемый материал одновременно могут быть

использованы в конструктивном исполнении современного помольного оборудования [4].

В настоящее время технологии получения дисперсных материалов активно развиваются. Значимые практические результаты в промышленном использовании получили дезинтеграторные (роторно-центробежные) мельницы. Их конструктивное исполнение может сочетать в себе различные технологические возможности: измельчение, смешение, классификацию и микрогрануляцию [5].

В малотоннажных производствах строительных материалов для тонкого и сверхтонкого помола среднепрочных горных пород (твердость по шкале Мооса не более 7 единиц) широко используются дезинтеграторы [6, 7]. Многообразие существующих конструкций дезинтеграторов имеет ряд конструктивных и технологических недостатков: неравномерность гранулометрического состава готового продукта, отсутствие возможности классификации частиц внутри помольной камеры мельницы, повышенный износ рабочих элементов роторов, сложность организации

эффективной работы дезинтеграторов с различными сырьевыми материалами и др. [8–10].

Следует отметить, что в различных зонах помольной камеры дезинтеграторной мельницы материал подвергается разрушению при неодинаковых условиях: величина энергии удара, необходимая для эффективного разрушения кусков (частиц) материала, возрастает при динамике двухфазного потока от центра помольной камеры к периферии. Под действием радиального движения двухфазного потока во встречных направлениях вращения роторов мельницы возникает сопротивление этому потоку со стороны концентрично расположенных на роторах ударных элементов. Во время этого процесса частицы материала диспергируются за счет различных механических воздействий: удара, истирания, сдвига, иного сложного напряженного состояния в сочетании с указанными выше [11].

Организация эффективного процесса измельчения материалов внутри помольной камеры дезинтегратора позволяет получать конечный продукт с узким гранулометрическим составом. За счет специально подобранных режимов работы агрегата при измельчении различных материалов достигается рациональная эксплуатация дезинтегратора, повышается надежность его использования и увеличивается межремонтный период [12]. Для полноценной оценки эффективной работы помольной камеры дезинтегратора необходимо учесть всевозможные условия динамики частиц в воздушно-материальном потоке, а

также определить его рациональные скоростные параметры. Потому что именно скоростной режим двухфазного потока будет определять качество конечного продукта, износ ударных элементов роторов мельницы, производительность и энергоэффективность агрегата.

В работах ряда авторов [13, 14] устанавливается влияние конструктивных параметров мельниц на величину скоростного режима двухфазного потока. Существующие методы расчета скоростей частиц в потоке воздуха внутри мельницы показывают, что не являются универсальными в виду их конструктивных особенностей. Следовательно, для оригинальных конструкций мельниц дезинтеграторного типа целесообразно разрабатывать новые математические модели процесса динамики двухфазного потока, которые позволят более полно представить сущность процесса измельчения материалов и выявить принципы процессного управления. Целью научного исследования является математическое описание динамики двухфазного потока внутри помольной камеры дезинтегратора оригинальной конструкции [15], которое позволит определить рациональные режимы его работы для материалов с различными физико-механическими характеристиками.

Методы и оборудование. Математическое моделирование динамики двухфазного потока внутри помольной камеры производилось для дезинтегратора [15], показанного на рисунке 1а. Устройство и принцип действия дезинтегратора представлен на рисунке 1б.



а)

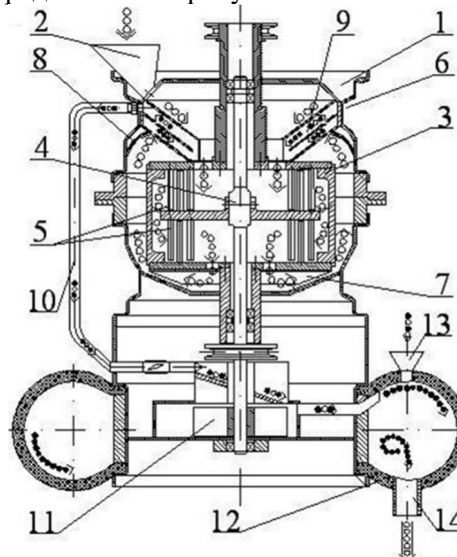


Рис. 1. Дезинтегратор: а) – опытно-экспериментальный образец; б) – устройство: 1 – корпус; 2 – загрузочное устройство; 3 – наружный ротор; 4 – внутренний ротор; 5 – ударные элементы; 6 – тангенциальный разгрузочный патрубок для готового продукта; 7 – вентиляторные лопасти; 8 – дугообразный направляющий конус; 9 – гравитационный сепаратор; 10 – соединительный трубопровод; 11 – вентиляторное колесо; 12 – камера гомогенизации дисперсных материалов; 13 – воронка загрузочная для добавок; 14 – разгрузочное устройство

Дезинтеграторная мельница [15] функционирует как сложный агрегат в следующей после-

довательности. Материал для помола через загрузочное устройство 2, смонтированное на корпусе 1 мельницы, подается в помольную камеру,

которая, в свою очередь, состоит из наружного 3 и внутреннего 4 роторов. Посредством многократных высоконагруженных ударов от элементов 5, вращающихся в противоположные стороны, материал интенсивно измельчается. В верхней части помольной камеры материал подвергается центробежному диспергированию и перемещается затем в нижнюю ее часть. После этого в нижней части помольной камеры - на пути от периферии к центру - под действием разряжения, которое создают вентиляторные лопасти 7, материал диспергируется и попадает в пространство между корпусом и помольной камерой. После чего воздушно-материальный поток через дугообразный направляющий конус 8 поступает в гравитационный сепаратор 9. В сепараторе под действием силы тяжести материал разделяется на крупку, которая возвращается на доизмельчение в помольную камеру, и готовый продукт, выводимый из агрегата с помощью тангенциального разгрузочного патрубка 6 в осадительную камеру или рукавный фильтр (на рисунке 1 не показаны). Наряду с вышеуказанной схемой работы агрегата существует технологическая возможность вывода готового продукта через тангенциальный разгрузочный патрубок 6, соединенный с трубопроводом 10, посредством разряжения. Этот перепад давлений создается вентиляторным колесом 11, соединенным с камерой гомогенизации дисперсных материалов 12. В камеру гомогенизации 12, где, например, происходит смешение активированного вяжущего с наполнителем, через загрузочную воронку 13 подаются дополнительные компоненты – необходимые добавки. Затем готовый гомогенный продукт в виде дисперсной смеси разгружается через устройство 14.

С помощью математического метода крупных частиц [16] для дезинтегратора [15] оригинальной конструкции моделировались скоростные параметры движения несущей фазы и твердых (измельчаемых) частиц. Данный численный метод разработки математических моделей аэродинамики основан на последовательном использовании эйлерового и лагранжевого подходов и максимально адаптирован к получению достоверной информации.

Исследование с помощью математического моделирования движения двухфазного потока в помольной камере мельницы характеризуется представлениями о полях скоростей частицы и несущей фазы – воздуха. Воздушно-материальная смесь, подвергаемая измельчению, представляет собой неразрывный континуум частиц, определенным образом распределенный в объеме воздуха. Определение каждой составляющей движения двухфазного потока в дезинтеграторе

позволяет оценить максимально возможную производительность агрегата при его минимальной потребляемой мощности.

Основная часть. С учетом вышеизложенного представим плоскую модель движения двухфазного потока в помольной камере дезинтегратора [15]. При разработке модели сделаем допущение, что радиальная и тангенциальная скорости движения несущей фазы (воздуха) и твердой фазы (частиц измельчаемого материала) определяются лишь расстоянием от оси вращения роторов мельницы. Это допущение связано с тем, что в поле центробежных сил помольной камеры энергия разрушения частиц на определенных конструкцией мельницы радиусах установки ударных элементов различна. Величина энергии, необходимая для разрушения материала, увеличивается от оси к периферии камеры в виду уменьшения его средневзвешенного размера частиц (кусков).

Для удобства математического описания процесса движения двухфазного потока внутри помольной камеры введем полярную систему координат (ρ, φ) . Полярная система координат имеет центр на оси вращения роторов дезинтегратора. Тогда начало математического описания будет представлять собой систему дифференциальных уравнений, которая описывает скоростные характеристики двухфазного потока. Для нашей математической модели процесса динамики двухфазного потока система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} V_r \frac{dV_r}{dr_1} - \frac{V_\varphi^2}{r_1} = \frac{1}{\tau} (U_r - V_r), \\ V_r \frac{dV_\varphi}{dr_1} - \frac{V_r \cdot V_\varphi}{r_1} = \frac{1}{\tau} (U_\varphi - V_\varphi). \end{cases} \quad (1)$$

Для этой системы U_r, V_r – радиальные составляющие скоростей, соответственно, несущей фазы (воздуха) и твердой фазы (частиц измельчаемого материала), m/c ; U_φ, V_φ – тангенциальные составляющие скоростей, соответственно, несущей фазы (воздуха) и твердой фазы (частиц измельчаемого материала), m/c ; r (r_i) – относительный радиальный размер, отсчитываемый от оси вращения роторов и характеризующий положение частицы измельчаемого материала на роторе, m ; τ – время релаксации частицы, c , определяется на основании [17] по формуле:

$$\tau = \frac{2\rho_r r_r^2}{9\mu}, \quad (2)$$

здесь ρ_r – плотность измельчаемого материала, kg/m^3 ; r_r – радиус частицы (куска) измельчаемого материала, m ; μ – коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха внутри помольной камеры дезинтегратора, определяемые в соответствии с методикой [18], $Pa \cdot c$.

Отметим здесь, что скоростные параметры

воздушного и материального потоков являются постоянными величинами. Для нашей математической модели сумма радиальных и тангенциальных скоростей частиц измельчаемого материала, движущегося в воздушном потоке, будет определять значение абсолютной скорости динамики частиц измельчаемого материала внутри этого потока.

Воздух в потоке с частицами обтекает цилиндрические поверхности ударных элементов и сходит с них, значит, выражение для определения радиальной составляющей скорости схода несущей фазы в первом выражении системы (1) из выражения [19] будет иметь вид:

$$U_r = \Omega_i \cdot R_i \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2}}, \quad (3)$$

где Ω_i – угловая характеристика скорости ударного элемента роторов дезинтегратора для каждого i -ого ряда, rad/c (c^{-1}); R_i – текущий радиус помольной камеры, m ; d_y – диаметр ударного элемента круглой формы, m . Соотношение $\frac{d_y}{R_i}$ определим как величину первого порядка малости.

Примем, что согласно результатам исследований [20, 21] величина радиальной составляющей скорости схода несущей фазы с частицами с рабочей поверхности круглого ударного элемента определяется из выражения:

$$V_\varphi^2 = \frac{R_i^2 \left[\Omega_i (\Omega_i \cdot \tau \cdot \cos(\xi)) + (2 + 2\sin(\xi)) \cdot \left\{ \cos(\xi) - \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2} (1 + \sin(\xi))} \right\} \right]}{2\tau \cdot \ln(R_i) \cdot (1 + \sin(\xi))^2} \quad (9)$$

На основании выражения (9) величина тангенциальной составляющей скорости частицы измельчаемого материала при сходе с поверхности круглого ударного элемента агрегата

$$V_\varphi = R_i \sqrt{\frac{\Omega_i}{2\tau \cdot \ln(R_i)}} \cdot \left[\frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)} \left(\frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)} \cdot \tau \cdot \Omega_i + 2 \right) - 2 \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2}} \right]. \quad (10)$$

Тогда из второго уравнения системы (1) с учетом (6) определяем, что тангенциальная ско-

$$U_\varphi = R_i \sqrt{\frac{\Omega_1}{2\tau \cdot \ln(R_i)}} \left\{ X(X \cdot \tau \cdot \Omega_1 + 2) - 2 \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2}} \right\} \cdot [\Omega_1 \cdot \tau \cdot X \cdot (1 - \ln(R_i) + 1)]. \quad (11)$$

Окончательно после математических преобразований с учетом подстановок (6) в уравнение

$$U_\varphi = R_i \sqrt{\frac{\Omega_1}{2\tau \cdot \ln(R_i)}} \left\{ \frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)} \left(\frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)} \cdot \tau \cdot \Omega_1 + 2 \right) - 2 \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2}} \right\} \cdot \left[\Omega_1 \cdot \tau \cdot \frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)} (1 - \ln(R_i) + 1) \right]. \quad (12)$$

Установленные в ходе математического описания значения скоростных параметров двухфазного потока внутри помольной камеры дезинтегратора позволяют рассчитать рациональные режимы работы агрегата для различных материалов. Выражение (12) устанавливает зависимость

$$V_r = \frac{\Omega_i \cdot R_i \cdot \cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)}, \quad (4)$$

где ξ – угол трения, с помощью этого угла учитывается характер скольжения частицы измельчаемого материала по поверхности круглого ударного элемента, $град$.

Для удобства последующей математической записи модели представим выражение (4) в виде:

$$V_r = \Omega_i \cdot R_i \cdot X, \quad (5)$$

здесь X – коэффициент, устанавливающий взаимосвязь процесса трения частицы измельчаемого материала с поверхностью круглого ударного элемента. Его числовое значение можно определить так:

$$X = \frac{\cos(\xi)}{1 + \sin(\xi)}. \quad (6)$$

Выражая значение тангенциальной скорости частицы из первого уравнения системы (1), определяем:

$$V_\varphi^2 = \frac{(V_r^2 \cdot \tau - 2R_i(U_r - V_r))}{2\tau \cdot \ln(R_i)}. \quad (7)$$

Раскрывая далее систему (1), в аналитическое выражение (7) подставляем (5) и (6):

$$V_\varphi^2 = \frac{\frac{\Omega_i^2 \cdot R_i^2 \cdot \tau \cdot \cos^2(\xi)}{(1 + \sin(\xi))^2} - 2R_i \left(\Omega_i \cdot R_i \sqrt{2 - \frac{d_y^2}{4R_i^2}} - \frac{\Omega_i \cdot R_i \cdot \cos(\xi)}{(1 + \sin(\xi))^2} \right)}{2\tau \cdot \ln(R_i)}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) после алгебраического преобразования примет вид:

будет определяться из окончательного выражения так:

рость воздушного потока в момент схода с рабочего элемента будет представлять собой следующую зависимость:

(11) получим:

тангенциальной скорости несущей фазы от технологических и конструктивных параметров дезинтегратора.

Результаты численного расчета по полученной математической модели представлены на рисунке 2.

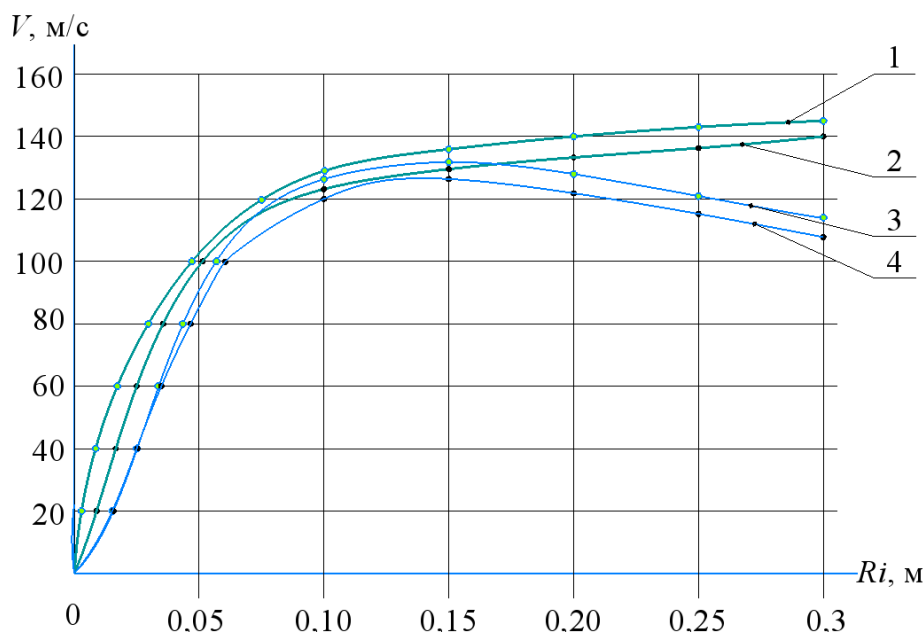


Рис. 2. Распределение скоростей двухфазного потока в зависимости от текущего радиуса помольной камеры: 1 – радиальная составляющая скорости несущей фазы (воздуха) в динамическом двухфазном потоке; 2 – радиальная составляющая скорости частицы измельчаемого материала в динамическом двухфазном потоке; 3 – тангенциальная составляющая скорости несущей фазы (воздуха) в динамическом двухфазном потоке; 4 – тангенциальная составляющая скорости частицы измельчаемого материала в динамическом двухфазном потоке

Из графика видно, что максимальные значения скоростей для тангенциальной составляющей находятся в пределе по R_i между 0,1–0,15 м и составляет для воздушной среды 131 м/с, а для средневзвешенной частицы с $d_{cp} = 40$ мкм – 127,5 м/с. Здесь нужно отметить, что в диапазоне $R_i = 0,15 – 0,3$ м прирост радиальной составляющей скоростей воздушной несущей среды и средневзвешенного потока частиц составляет около 14,5 % (радиальная скорость несущей среды (воздуха) при $R_i = 0,15$ м составляет $U_r = 136,3$ м/с, при $R_i = 0,3$ м – $U_r = 148,1$ м/с; радиальная скорость средневзвешенных частиц при $R_i = 0,15$ м $V_r = 129,2$ м/с, при $R_i = 0,3$ м $V_r = 140,1$ м/с). Значит, кинетическая энергия измельчаемых частиц пропорционально квадрату радиальной скорости увеличивается и, тем самым, обеспечивается повышение интенсивности процесса измельчения.

Для тангенциальной составляющей скоростей двухфазного потока наблюдается следующая картина. Из графика видно, что после прохождения порогового значения $R_i = 0,15$ м тангенциальная скорость и несущей фазы, и движущихся частиц начинает снижаться. При $R_i = 0,3$ м это снижение происходит до значений $U_\phi = 114,3$ м/с и $V_\phi = 109,2$ м/с, соответственно. Данный графический характер изменений в тангенциальной составляющей скоростей несущей фазы и частиц связан, прежде всего, с ростом радиальной скорости двухфазного потока и увели-

чением вентиляционного эффекта работы дезинтегратора, что объясняется исследованиями в работах [22–25]. В этих работах было установлено, что на радиальную скорость двухфазного потока в меньшей степени влияет аэродинамическое сопротивление помольной камеры, так как оно практически полностью компенсируется подпором измельчаемого материала. Также здесь необходимо учесть, что при увеличении R_i растет величина угловой скорости Ω_i ударных элементов, что тоже, в свою очередь, снижает тангенциальную скорость двухфазного потока и увеличивает радиальную составляющую.

Не смотря на то, что значения всех составляющих скоростей двухфазного потока находятся в прямой зависимости от угловой скорости Ω_i ударных элементов, по анализу выражений (10) и (12) видно, что закон зависимости этих параметров друг от друга на некоторых участках графика функций принимает квадратичный характер, что соответствующим образом отражается на характере кривых, показанных на рисунке 2.

Из исследований [26–30] можно заметить, что с увеличением пылевидных частиц в увеличивающемся объеме помольной камеры (на ее периферии концентрация тонкого продукта в объеме воздуха увеличивается) также происходит снижение величины тангенциальной составляющей скорости динамического двухфазного потока по отношению к максимальным параметрам при $R_i = 0,15$ м в среднем на 15,5 % (тангенциальная скорость воздушной несущей среды

при $R_i = 0,15$ м составляет $U_\varphi = 132,3$ м/с, при $R_i = 0,3$ м - $U_\varphi = 114,3$ м/с; тангенциальная скорость средневзвешенных частиц при $R_i = 0,15$ м $V_\varphi = 127,4$ м/с, при $R_i = 0,3$ м $V_\varphi = 109,2$ м/с).

При фиксированных значениях угловых скоростей Ω_i ударных элементов, расположенных на концентрических рядах роторов дезинтегратора, произведена оценка влияния R_i на характер движения двухфазного потока. В процессе моделирования принималось, что роторы дезинтегратора вращаются с постоянной частотой вращения $n_{1,2} = 10000$ об/мин. В результате такого анализа данных в ходе исследований подтвердилось, что скоростные параметры двухфазного потока в центробежном поле помольной камеры при фиксированных параметрах вращения роторов, главным образом, зависят от радиального размера помольной камеры. Именно при различном значении R_i после $R_i = 0,15$ м продолжается рост радиальных скоростей несущего потока и частиц, а также начинается снижение тангенциальной скорости и несущей фазы, и частиц измельчаемого материала.

Выводы. Сформулировано и представлено математическое описание для динамики двухфазного потока внутри помольной камеры дезинтегратора, которое позволяет определять скоростные характеристики режимов его работы для материалов с различными физико-механическими свойствами.

Установлено, что при различном значении текущего радиуса помольной камеры R_i после экстремума при $R_i = 0,15$ м для тангенциальных составляющих двухфазного потока продолжается рост радиальных составляющих скоростей несущего потока и частиц измельчаемого материала.

Подтверждено, что с ростом концентрации пылевидных частиц в увеличивающемся объеме помольной камеры (на ее периферии концентрация тонкого продукта в объеме воздуха увеличивается) происходит снижение значения тангенциальной составляющей скорости динамического двухфазного потока по отношению к максимальным параметрам при $R_i = 0,15$ м в среднем на 15,5 %.

Определено, что максимальные значения скоростей для тангенциальной составляющей находятся в пределе по R_i между 0,1-0,15 м и составляет для воздушной среды 131 м/с, а для средневзвешенной частицы с $d_{cp} = 40$ мкм – 127,5 м/с.

С помощью математического описания установлено, что в диапазоне от $R_i = 0,15$ м до $R_i = 0,3$ м прирост радиальных составляющих скоростей воздушной несущей среды и средневзвешенного потока частиц составляет около

14,5 %, что свидетельствует о росте кинетической энергии измельчаемых частиц при движении динамического двухфазного потока от центра к периферии помольной камеры дезинтегратора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Л.Н., Аликина И.Б., Усов Б.А. Структурообразование в системах при производстве строительных материалов: учеб. пособие. Москва: ИНФРА-М, 2018. 61 с.
2. Гараева А.Ф., Сафин Р.Р., Кайнов П.А., Хасаншин Р. Р. Технология природных строительных материалов и изделий на их основе: практикум. Казань: КНИТУ, 2019. 100 с.
3. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2015. Вып. XIV. 495 с.
4. Карпачев Д.В. Совершенствование технологии измельчения и обогащения рудных и нерудных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, Научно-теоретический журнал. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. № 2. С. 103-107.
5. Евтушенко Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. 209 с.
6. Хинт И.А. Основы производства силикатных изделий. М.: Госстройиздат, 1962. 601 с.
7. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Воронов В.П. Дезинтеграторы. Конструкции. Теория. Эксперимент: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 235 с.
8. Колобов М.Ю., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Повышение долговечности рабочих органов центробежно-ударных измельчителей // Российский химический журнал. Иваново. 2019. Т. LXIII, № 3-4. С. 40-44. DOI:10.6060/rcj.2019633.5.
9. Прокопец В.С., Акимов В.В. Увеличение работоспособности мельниц ударного действия с помощью твердых безвольфрамовых сплавов // «Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века». 2005. №7. С. 50-51.
10. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Королёв И.Г. Дезинтегратор с ударно-сдвиговым воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 102-105.
11. Хетагуров В.Н. Разработка и проектирование центробежных мельниц вертикального типа. Владикавказ: Терек, 1999. 225 с.
12. Жуковский Ю.Л., Малькова Я.М. Классификация способов повышения эффективности

процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 4 (162). С. 20–35. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35.

13. Прокопец В.С., Иванова Т.Л. Математическая модель эффективности механоактивационных процессов в строительных материалах // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 8. С. 71–73.

14. Ключков Н.В., Блиничев В.Н., Бобков С.П., Пискунов А.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1982. №2. С. 230–232.

15. Пат. № 2377070, МПК7 В 02 С 13/22. Дезинтегратор / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Глаголев Е.С., Качаев А.Е. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», ООО «ТК-РЕЦИКЛ». №2008118079/03; заявл. 06.05. 08; опубл. 27.12.09, Бюл. №36.

16. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, Физматгиз, 1982. 392 с.

17. Краснов Н.Ф. Аэродинамика / Ч.1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла / Учебник для ВТУЗов. Изд. 2-е перераб и доп. М.: Высшая школа, 1976. 384 с., ил.

18. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 3-е изд. 1972. 410 с.

19. Христианович С.А. Обтекание тел газом при больших скоростях // Труды ЦАГИ №481, 1940. 276 с.

20. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на

обрабатываемые вещества. М.: «Изд-во Машиностроение - 1», 2004. 136 с.

21. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 386 с.

22. Постникова И.В., Блиничев В.Н. Математическое описание энерго-ресурсосберегающих процессов в аппарате комбинированного действия // В сборнике: Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. V Международная конференция Российского химического общества им. Д.И. Менделеева: тезисы докладов. 2013. С. 31–33.

23. Смутьский И.И. Взвешенный слой частиц в цилиндрической вихревой камере // Журн. прикл. химии. 1983. №8. С. 1782–1789.

24. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. Изд-во: М.: Машиностроение, 1994 г. 320 с.

25. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 121–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127

26. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 353 с.

27. Левич В.Г., Мясников В.П. Кинетическая теория псевдооживленного состояния // Химическая промышленность. 1966. № 6. С. 404–408.

28. Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., Chepurny N. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field // Journal of fluid mechanics. 1984. Pp. 223–256.

29. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

30. Wen C.-Y., Yu Y.H. Mechanics of Fluidization // Chem. Eng. Prog. Symp. Series. 1966. Pp. 100–111.

Информация об авторах

Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, дом 408.

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: tkmm@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чемеричко Галина Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: kafedramo120@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Орехова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.12.2023 г.

© Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Чемерицко Г.И., Орехова Т.Н., 2024

^{1,*}Kachaev A.E., ²Sevostyanov V.S., ²Chemerichko G.I., ²Orekhova T.N.

¹Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

*E-mail: doctor_cement@mail.ru

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE DYNAMICS OF CENTRIFUGAL TWO-PHASE FLOW IN THE GRINDING CHAMBER OF A DISINTEGRATOR

Abstract. Rational control of equipment operating modes in the production of building materials is possible only in the case of a mathematical description of various technological processes. The sequence of calculation methods for determining the design and technological parameters of grinding equipment makes it possible to numerically present the results of calculations of rational operating modes of the equipment. The study presents a mathematical description of the dynamics of a two-phase flow inside the grinding chamber of a disintegrator, which helps to determine the speed characteristics of its operating modes for materials with different physical and mechanical properties. The nature of the change in the tangential components of the velocities of the two-phase flow has been established: the range of the current radius of the grinding chamber R_i has been determined, at which the radial components of the velocities of the carrier flow and particles of the ground material continue to increase. As a result of mathematical modeling, it was confirmed that with an increase in the concentration of dust particles in the increasing volume of the grinding chamber, the value of the tangential component of the velocity of a dynamic two-phase flow decreases in relation to the maximum parameters at $R_i = 0.15$ m by an average of 15.5 %. It has been determined that the maximum velocity values for the tangential component are in the limit of $R_i = 0.1-0.15$ m and are 131 m/s for air, and 127.5 m/s for an average suspended particle with $d_{cp} = 40$ μ m. In the process of developing a mathematical description, it was established that in the range $R_i = 0.15-0.3$ m the increase in the radial components of the velocities of the air carrier medium and the weighted average particle flow is about 14.5%. It indicates an increase in the kinetic energy of the crushed particles during the movement of a dynamic two-phase flow from the center to the periphery of the grinding chamber of the disintegrator.

Keywords: disintegrator, two-phase flow, particle, radial velocity, tangential velocity, particle dynamics.

REFERENCES

1. Popov L.N., Alikina I.B., Usov B.A. Structure formation in systems in the production of construction materials: textbook [Strukturoobrazovaniye v sistemakh pri proizvodstve stroitel'nykh materialov: uchebnoye posobiye]. Moscow: INFRA-M, 2018. 61 p. (rus)
2. Garayeva A.F., Safin R.R., Kainov P.A., Khasanshin R.R. Technology of natural building materials and products based on them: workshop [Tekhnologiya prirodnykh stroitel'nykh materialov i izdelij na ih osnove: praktikum]. Kazan: KNRTU, 2019. 100 p. (rus)
3. Bogdanov V.S. ed. Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: interuniversity. Sat. Art. [Energoberegayushchiye tekhnologicheskiye kompleksy i oborudovaniye dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov: mezhvuz. sb. st.]. Vol. XIV. Belgorod, 2015. 495 p. (rus)
4. Karpachev D.V. Improving the technology of grinding and beneficiation of ore and non-metallic materials [Sovershenstvovaniye tekhnologii izmel'cheniya i obogashcheniya rudnykh i nerudnykh materialov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 2. Pp. 103–107. (rus)
5. Evtushenko E. I. Activation processes in the technology of building materials: monograph [Aktivatsionnyye protsessy v tekhnologii stroitel'nykh materialov: monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU named after. V. G. Shukhova, 2003. 209 p. (rus)
6. Hint I.A. Basics of production of silicalcite products [Osnovy proizvodstva silikal'citnykh izdelij]. M.: Gosstrojizdat. 1962. 601 p. (rus)
7. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Voronov V.P. Disintegrators. Constructions. Theory. Experiment: monograph [Dezintegratory. Konstruktsii. Teoriya. Eksperiment: monografiya]. Belgorod: Publishing House of BSTU named after. V.G. Shukhova, 2016. 235 p. (rus)
8. Kolobov M.Yu., Chagin O.V., Blinichev V.N. Increasing the durability of the working bodies of centrifugal impact shredders [Povyshenie dolgovechnosti rabochih organov centrebezhnoudarnykh izmel'chitelej]. Russian chemical journal. Ivanovo. 2019. Vol. LXIII, No. 3–4. Pp. 40–44. DOI:10.6060/rcj.2019633.5. (rus)
9. Prokopec V.S., Akimov V.V. Increasing the performance of impact mills using hard tungsten-

free alloys [Uvelichenie rabotosposobnosti mel'nic udarnogo dejstviya s pomoshch'yu tverdyh bezvol'framovykh splavov]. "Building materials, equipment, technologies of the 21st century". 2005. No.7. Pp. 50–51. (rus)

10. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Korolev I.G. Disintegrator with shock-shear effect on the crushed material [Dezintegator s udarno-sdvigovym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material] Bulletin of the Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. 2010. No. 1. Pp. 102–105. (rus)

11. Khetagurov V.N. Development and design of centrifugal mills of vertical type [Razrabotka i proyektirovaniye tsentrobezhnykh mel'nits vertikal'nogo tipa]. Vladikavkaz: Terek, 1999. 225 p. (rus)

12. Zhukovsky Yu.L., Malkova Ya.M. Classification of methods for increasing the efficiency of the grinding process and implementation of energy-efficient control algorithms for a double-motor electric drive of a mill [Klassifikatsiya sposobov povsheniya effektivnosti protsessa izmel'cheniya i realizatsiya energoeffektivnykh algoritmov upravleniya dvukhdvigatel'nym elektroprivodom mel'nitsy] Mining equipment and electromechanics. 2022. No. 4 (162). Pp. 20–35. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35. (rus)

13. Prokopets V.S., Ivanova T.L. Mathematical model of the efficiency of mechanical activation processes in building materials [Matematicheskaya model' effektivnosti mekhanoaktivatsionnykh protsessov v stroitel'nykh materialakh]. Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2005. No. 8. Pp. 71–73. (rus)

14. Klochkov N.V., Blinichev V.N., Bobkov S.P., Piskunov A.V. Methodology for calculating air flow in a centrifugal impact mill [Metodika rascheta raskhoda vozdukh v tsentrobezhno-udarnoy mel'nitse]. News of universities. Chemistry and chemical technology. 1982. No. 2. Pp. 230–232. (rus)

15. Gridchin A.M., Sevost'yanov V.S., Glagolev E.S., Kachaev A.E. Disintegrator. Patent RF, no. 2377070, 2009. (rus)

16. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. Large particle method in gas dynamics. Computational experiment. [Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike. Vychislitel'nyy eksperiment]. M.: Nauka, Fizmatgiz, 1982. 392 p. (rus)

17. Krasnov N.F. Aerodynamics/ Part 1. Basics of the theory. Aerodynamics of the profile and wing [Aerodinamika / Ch.1. Osnovy teorii. Aerodinamika profilya i kryla]. Textbook for technical colleges. M.: Higher School, 1976. 384 p. (rus)

18. Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. Elements of applied mathematics [Elementy prikladnoy matematiki]. M.: Science. 1972. 410 p. (rus)

19. Khristianovich S.A. Flow of gas around bodies at high speeds [Obtekaniye tel gazom pri bol'shikh skorostyakh]. Proceedings of TsAGI 1940. No. 481. 276 p. (rus)

20. Promtov M.A. Machines and devices with pulsed energy effects on processed substances [Mashiny i apparaty s impul'snymi energeticheskimi vozdeystviyami na obrabatyvayemye veshchestva]. M.: "Publishing house Mashinostroenie - 1". 2004. 136 p. (rus)

21. Goldshtik M.A. Vortex flows [Vikhrevyye potoki]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 386 p. (rus)

22. Postnikova I.V., Blinichev V.N. Mathematical description of energy-resource-saving processes in a combined action apparatus. In the collection: Resource- and energy-saving technologies in the chemical and petrochemical industry. V International Conference of the Russian Chemical Society named after. D.I. Mendeleev: abstracts of reports. 2013. Pp. 31–33. (rus)

23. Smulsky I.I. Suspended layer of particles in a cylindrical vortex chamber [Vzveshennyy sloy chastits v tsilindricheskoy vikhrevoy kamere]. Journal of Applied Chemistry. 1983. No. 8. Pp. 1782–1789. (rus)

24. Sternin L.E., Schreiber A.A. Multiphase gas flows with particles [Mnogofaznyye techeniya gaza s chastitsami]. Publishing house: M.: Mashinostroenie, 1994, 320 p. (rus)

25. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended layer with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers [Mekhanika vzveshennogo sloya s polidispersnymi chastitsami v pnevmosmesitelyakh nepreryvnogo deystviya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 121–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127. (rus)

26. Fuks N.A. Aerosol mechanics [Mekhanika aerozoley]. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1955. 353 p. (rus)

27. Levich V.G., Myasnikov V.P. Kinetic theory of fluidized state [Kineticheskaya teoriya psevdoozhizhennogo sostoyaniya] Chemical industry. 1966. No. 6. Pp. 404–408. (rus)

28. Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., Chepurniy N. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. Journal of fluid mechanics. 1984. Pp. 223–256.

29. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

30. Wen C.-Y., Yu Y.H. Mechanics of Fluidization. Chem. Eng. Prog. Symp. Series. 1966. Pp. 100–111.

Information about the authors

Качаев, Александр Е. PhD, Head of the Department of Construction Production. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Moscow region, Kolomna, st. October Revolution, building 408.

Sevostyanov, Vladimir S. DSc, Professor, Head of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: tkmm@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chemerichko, Galina I. PhD, Assistant professor. E-mail: kafedramo120@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Orekhova, Tatyana N. PhD, Assistant professor. E-mail: nefact@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 18.12.2023

Для цитирования:

Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И., Орехова Т.Н. Математическое описание динамики центробежного двухфазного потока в помольной камере дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №2. С. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79

For citation:

Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Chemerichko G.I., Orekhova T.N. Mathematical description of the dynamics of centrifugal two-phase flow in the grinding chamber of a disintegrator. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 2. Pp. 70–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79