

УДК 621.926.5

Иванов А.Н., Чудный А.Ю.

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПНЕВМОПОДАЧИ КРУПКИ И ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ТРУБНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ

Известно, что применение помола в замкнутом цикле резко повышает эффективность помола, однако, возврат крупки вместе с исходным сырьем приводит к тому же эффекту в загрузочной зоне что и наличие переизмельченного продукта в агрегатах открытого цикла помола. Поэтому предлагается подавать крупку в ту зону мельницы, где средний гранулометрический состав материала близок к максимальному гранулометрическому составу крупки. Реализация этого предложения осуществляется с помощью пневмоподачи в виде двухфазной (твердая и газообразная фазы) струи.

Ранее нами было показано, что введение поверхностно активных веществ (ПАВ) необходимо осуществлять в зону, где их влияние наиболее эффективно. Поэтому предлагается подавать ПАВ в ту зону мельницы, где находится наибольшее количество частиц самой трудноразмалываемой фракции с учётом подвижности измельчаемого материала. Реализацию этого решения также предлагается осуществить с помощью пневмоподачи в виде двухфазной (жидкая и газообразная фазы) струи. Для этого разработана специальная конструкция пневмофорсунки с изменяющимся углом наклона подачи фаз.

При имеющемся ряде различий в струях пневмоподачи крупки и ПАВ у них есть много общего. Необходимо разработать математическую модель формирования струй и подачи их на определённые участки по длине шаровой камеры трубной мельницы

Турбулентное двухфазное течение представляет собой сложную систему, поведение которой определяется взаимодействием многих факторов. Движение взвешенных частиц в турбулентном потоке газа отличается гораздо большей, чем в ламинарном потоке, сложностью и интенсивностью в продольном и всех других направлениях. Это обусловлено тем, что частицы, в зависимости от размера, по разному реагируют на беспорядочные турбулентные пульсации среды и наряду с поступательным движением вместе с потоком совершают под их влиянием пульсационное (колебательное) движение относительно несущих их вихрей и беспорядочное перемещение вместе с вихрями, именуемое турбулентной диффузией частиц.

Частица материала в газовом потоке практически всегда движется неравномерно, ее скорость меняется как по величине, так и по направлению. В реальных потоках газозвеси на движение частиц, кроме аэродинамического сопротивления, могут влиять другие факторы, в частности концентрационная и геометрическая стесненность, вращение частиц, скоростная и температурная неравномерность потока, внешние поля.

Траектории твердых частиц зависят от их размеров и формы. Размер частиц крупки определяется требованиями к гранулометрии готового продукта и условиями помола.

Радиус капель ПАВ определяется внешним давлением и силами поверхностного натяжения:

$$r = \frac{2\sigma}{P},$$

где σ – поверхностное натяжение, Н/м; P – внешнее давление, Па.

По формуле можно найти размер капель ПАВ, которые будут находиться в струе.

Проблема распространения двухфазной турбулентной струи представляет большой практический интерес. Двухфазные струи, состоящие из смеси газа с твердыми частицами или каплями жидкости, встречаются в различных областях техники. К ним относятся топливные факелы, создаваемые форсунками разных типов в камерах сгорания реактивных двигателей и промышленных топках, во вращающихся печах обжига, струи пульверизационных краскораспылителей, пескоструйных аппаратов и т.п. Двухфазная струя образуется не только при истечении заранее приготовленной двухфазной смеси, но также и при распылении в воздухе (или другом газе) струи однородной капельной жидкости, когда в результате увлечения каплями частиц окружающего воздуха создается двухфазная струя, так как массы движущейся жидкости и воздуха оказываются соизмеримыми; иначе говоря, и при распылении однородной струи жидкости в газе мы с гидродинамической точки зрения имеем дело с газовой струей, содержащей тяжелые примеси. Следует отметить, что до недавнего времени в большинстве теоретических работ, посвященных струям, несущим твердые частицы или капли, примесь считалась пассивной. Однако наличие примеси существенно влияет на характеристики турбулентной струи. Струя под воздействием твердых частиц или капель становится уже и распространяется на большее расстояние. Так исследования Баранова А.Н. [1] показали, что при начальной скорости воздушного потока около 100 м/с из сопла диаметром 35 мм скорость воздуха на расстоянии 4 м от среза сопла не превышает 3 м/с на оси струи и угол ее раскрытия составляет 10–12°. Наличие в струе частиц диаметром до 10мм позволяет обеспечить подачу твердой фазы на расстояние 20–25 м, а при изменении вихревых структур на границе струи подача твердой фазы осуществлялась на расстояние до 75 м.

В работе Абрамовича Г.Н. [2] при теоретическом рассмотрении двухфазной струи предполагалось, что примесь влияет на характеристики струи через изменение ее плотности, так как известно, что если струя распространяется в пространстве меньшей плотности, то степень ее расширения ниже, чем у обычной затопленной струи. Оказалось, однако, что существенное уменьшение степени расширения струи и увеличение ее дальности не может быть объяснено только изменением плотности смеси. Абрамовичем Г.Н. была сделана попытка объяснить обнаруженное в опытах существенное влияние примеси на характеристики струи, и в рамках теории Прандтля предложена модель влияния примеси на турбулентную структуру струи, определяющую, как известно, степень ее расширения. Вслед за этой работой появился цикл работ, в которых последовательно согласно модели турбулентности – теории пути смешения Прандтля разрабатывалась теория струи, несущей тяжелые примеси. Однако все эти разработки велись в рамках исследования струй с малой концентрацией примеси, т.к. в основном они касались топливных факелов, где массовая концентрация топлива составляет менее 10%. Исследование струй с концентрацией твердой фракции до 90 % требуют принципиально новых подходов.

Исследование струй, несущих тяжелые твердые частицы или капли с концентрацией до 90 %, требует преодоления ряда трудностей, связанных с равномерным распределением транспортируемого материала, с созданием методики определения скоростей фаз, концентрации частиц и других характеристик струи, так как общепринятые методы их определения в турбулентных струях для двухфазных струй неприменимы.

Рассмотрим модель процесса транспортирования при следующей предпосылке - турбулентный вихрь несущего газа при своем движении увлекает все частицы и тормозится суммарной силой лобового сопротивления.

Характеристики турбулентности и угол раскрытия струи описываются пульсационными составляющими скорости газа и частиц. Два уравнения – уравнение количества движения для смеси и уравнение движения частицы – позволяют определить пульсационные скорости газа и частиц. В предположении, что транспортируемая среда представляет собой сферические частицы одинаковых размеров, диаметр капли значительно меньше пути смещения и что всеми силами, действующими на частицу, кроме силы сопротивления, можно пренебречь, эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} dv'_z + \varepsilon \cdot dv'_u &= 0; \\ m_q \frac{dv'_u}{dt} &= C_q \cdot \frac{\rho'_z (v'_z - v'_u) |v'_z - v'_u|}{2} F_q, \end{aligned} \quad (1)$$

где v'_z, v'_u – пульсационные составляющие поперечной скорости газа и частиц; $m_q = \pi D_q^3 \rho_q / 6$ – масса частицы; ρ_z, ρ_q – плотности газа и частиц; $F_q = \pi D_q^2 / 4$ – площадь миделева сечения частицы; t – время; $\varepsilon = G_q / G_z$ – относительная масса частиц; C_q – коэффициент сопротивления, который определяется по формуле Стокса.

$$C_q = \frac{24 \mu_z}{\rho_z |v'_z - v'_u| D_q},$$

где μ_z – вязкость газа.

В начале формирования вихря пульсационная скорость газа имеет величину

$$v'_{z0} = l_u (\partial u / \partial y),$$

где l_u – путь смещения; u – продольная скорость; y – поперечная координата.

Если вторая фаза в струе отсутствует или ее концентрация очень мала, то в соответствии с теорией Прандтля величина этой скорости сохраняется в течение всего времени существования вихря, от момента выделения его из одного слоя потока до слияния с другим. Если же струя содержит твердые или жидкие частички, то величина пульсационной скорости меняется, уменьшаясь к концу времени существования вихря, когда скачкообразно происходит потеря индивидуальности вихря и он отдает принесенное им количество движения новому слою.

Начальная скорость частиц в вихре зависит от их размера. Принимаем, что осредненное движение газа и частиц равновесно, т.е. осредненные скорости частиц и газа совпадают. За время формирования вихря сравнительно крупные частицы, время релаксации которых значительно больше времени формирования, не успевают приобрести значительную скорость, и ее для таких частиц можно считать равной нулю. Если же частицы сравнительно мелкие, то они за время формирования вихря могут приобрести начальную скорость, которую нельзя считать равной нулю, но в то же время нельзя считать, что скорости частиц и газа совпадают. В пределе частицы, диаметр которых стремится к нулю, к началу существования вихря (за время его формирования) приобретают скорость, равную пульсационной скорости газа, т.е. частицы ведут себя, как газ.

После интегрирования системы уравнений (1) при условиях

$$v'_z = v'_{z0} \text{ и } v'_u = v'_{u0} \text{ при } t = 0$$

получаем

$$v'_z - v'_{z0} = -\varepsilon(v'_u - v'_{u0});$$

$$\ln \frac{v'_z - v'_u}{v'_{z0} - v'_{u0}} = -\frac{18\mu_z(1+\varepsilon)}{\rho_u D_u^2} t_g,$$

где t_g – время взаимодействия частиц с вихрем.

Обозначим $\Delta v' = v'_z - v'_u$ (относительная скорость газа).

Так как считается, что вихрь в течение своего существования сохраняет транспортируемые частицы, т.е. взаимодействие с частицами происходит на всем пути движения газового вихря, то путь, пройденный частицами, следует считать равным пути смещения l_u . Тогда время взаимодействия частиц с вихрем t_g определится по формуле

$$t_g = 2l_u / (v'_{u0} + v'_u).$$

Отсюда

$$\ln \frac{\Delta v'}{\Delta v'_0} = -2 \frac{18\mu_z(1+\varepsilon)}{\rho_u D_u^2 (v'_u + v'_{u0})} l_u,$$

$$v'_z = (v'_{z0} + \varepsilon \Delta v' + \varepsilon v'_{u0}) / (1 + \varepsilon),$$

$$v'_u = (v'_{z0} - \Delta v' + \varepsilon v'_{u0}) / (1 + \varepsilon).$$

Вышеприведенные результаты справедливы для струи подачи ПАВ, где размер капле регулируется с помощью давления, создаваемого в камере смешивания газообразной и жидкой фаз.

Подача крупки имеет свою специфику, т.к. для частиц сравнительно большой крупности и большого удельного веса ускорение, получаемое за счет разности скоростей частиц и газа, сравнимо с ускорением силы тяжести, т.е. на турбулентную структуру течения будет оказывать влияние не только присутствие, но и вес частиц.

Если струя направлена вертикально вверх, то сила тяжести, действующая на частицу, уменьшает положительные пульсационные составляющие продольной скорости частиц и увеличивает по абсолютной величине ее отрицательные составляющие. В соответствии с этим растут положительные составляющие пульсационной скорости газа и уменьшаются по абсолютной величине ее отрицательные составляющие. В результате должна появиться некоторая асимметрия в абсолютных величинах пульсационных составляющих продольной скорости частиц и газа. На поперечную составляющую пульсационной скорости в случае вертикального истечения струи сила тяжести, действующая на частицу, влияния не оказывает.

Если струя направлена горизонтально, то сила тяжести оказывает воздействие на поперечные составляющие пульсационной скорости и не влияет на ее продольные составляющие. Можно полагать, что касательные напряжения будут иметь ту же самую величину, что и в случае вертикального истечения струи.

В случае наклонной струи (при подаче крупки) вес частиц будет оказывать влияние на обе составляющие пульсационной скорости, и в соответствующем уравнении движения частиц нужно учесть оставляющие силы тяжести по направлению струи и по перпендикуляру к оси струи для определения соответственно продольной и поперечной составляющих пульсационной скорости.

Уравнение движения увлекаемой газовым вихрем частицы, учитывающее ее вес, имеет вид

$$m_{\text{ч}} \frac{dv'_{\text{чи}}}{dt} = C_{\text{ч}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} (v'_{\text{зи}} - v'_{\text{чи}}) |v'_{\text{зи}} - v'_{\text{чи}}|}{2} F_{\text{ч}} - g_i. \quad (2)$$

Здесь те же обозначения, что и в формуле 1, за исключением индексации, которая указывает направление составляющих скорости (1 – для горизонтальной струи, 2 – для вертикальной), g_i – составляющие ускорения g силы тяжести, действующей на частицу в направлении распространения струи ($g_i = g \sin \alpha$) и в направлении, перпендикулярном оси струи, ($g_i = g \cos \alpha$), α – угол наклона струи к поверхности земли.

Коэффициент сопротивления частицы, как и ранее, определяются по формуле Стокса.

Из (2) следует

$$dv'_{\text{чи}} = \left[\frac{18\mu_{\text{г}}}{\rho_{\text{ч}} D_{\text{ч}}^2} (v'_{\text{зи}} - v'_{\text{чи}}) - g_i \right] dt, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц.

Пульсационные составляющие скорости газа и частиц через относительную скорость газа $\Delta v'_i = v'_{\text{зи}} - v'_{\text{чи}}$ с помощью уравнения количества движения системы "газ–твердые частицы"

$$dv'_{\text{зи}} = -\varepsilon dv'_{\text{чи}},$$

которое после интегрирования имеет вид

$$v'_{\text{зи}} - v'_{\text{зи}0} = -\varepsilon (v'_{\text{чи}} - v'_{\text{чи}0}).$$

Отсюда

$$v'_{\text{зи}} = (v'_{\text{зи}0} + \varepsilon \Delta v'_i + \varepsilon v'_{\text{чи}0}) / (1 + \varepsilon),$$

$$v'_{\text{чи}} = (v'_{\text{зи}0} - \Delta v'_i + \varepsilon v'_{\text{чи}0}) / (1 + \varepsilon).$$

После подстановки в уравнение (3) и интегрирования получаем

$$\ln \frac{\Delta v'_i - g_i / K}{\Delta v'_0 - g_i / K} = -K(1 + \varepsilon)t_{\text{г}}, \quad (4)$$

где

$$K = \frac{18\mu_{\text{г}}}{\rho_{\text{ч}} D_{\text{ч}}^2},$$

$t_{\text{г}}$ – время взаимодействия частиц с вихрем.

Время взаимодействия частиц с вихрем t_e определится по формуле

$$t_e = 2l_u / (v'_{c0i} + v'_{ci}),$$

где l_u – длина пути смещения.

В результате подстановки в (4) получаем уравнение для определения величины относительной пульсационной скорости

$$ln \frac{\Delta v' - g_i / K}{\Delta v'_0 - g_i / K} = \frac{2Kl_u(1 + \varepsilon)^2}{v'_{c0i} + (1 + 2\varepsilon)v'_{c0i} - \Delta v'}$$

Расчеты относительной пульсационной скорости $\Delta v'_i$ проводятся численно, т.к. неизвестная величина входит в обе части уравнения.

Величина относительной пульсационной скорости позволяет определить геометрические размеры струи. Меняя расход воздуха, его давление, диаметр сопла можно создать струю, которая обеспечит подачу материала (ПАВ или крупки) в заданную зону мельницы для оптимизации процесса помола. Дальнейшей задачей исследований является определение лобового сопротивления среды потоку частиц крупки и ПАВ в свободном от загрузки пространстве трубной мельницы с учётом изменяющейся концентрации запыленного аспирационного воздуха.

Литература

1. Баранов А.Н., Постельняк С.В. Теоретические основы формирования двухфазной турбулентной струи с изменённой формой когерентных структур // Науковий Вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2003, – № 23. – С. 200–204.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. – 717 с.

УДК 621.926.5

Иванов А.М., Чудний О.Ю.

ДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПНЕВМОПОДАЧІ КРУПКИ ТА ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН У ТРУБНІ МЛИНИ

Розглянута початкова частина математичної моделі формування струменів пневмоподачі крупки після сепаратора та поверхнево-активних речовин на визначені ділянки трубного млина.