

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук,

А.А. МЕДВЕДЕВА, А.А. ШЕВЧЕНКО

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

ВОПРОСЫ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕЧИСТКИ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

Оснащение и возможность вертикального перемещения промпродуктовой трубы с аэрирующим приспособлением позволяет путем изменения гидродинамической структуры потоков и зональной концентрации растворенных в жидкости газов осуществить наиболее рациональную турбулентно-аэрационную перечистку минеральных зерен в гидроциклоне с получением трех продуктов разделения [1, 2].

Подача воздуха в аэрирующее приспособление вызывает направленную циркуляцию, а микровихри от турбулизаторов обеспечивают необходимую интенсивность перемешивания и взаимодействие пузырьков воздуха и минеральных частиц во вторичной (промпродуктовой) зоне разделения гидроциклона.

Вероятность минерализации воздушных пузырьков P во вторичной зоне разделения в основном определяется как произведение вероятностей следующих событий

$$P = P_c P_z P_n,$$

где P_c , P_z , P_n – вероятности соответственно столкновения частиц с пузырьком, закрепления частицы при столкновении, сохранения закрепившейся на пузырьке частицы.

Чем выше вероятность каждого события, тем выше вероятность минерализации воздушных пузырьков.

Столкновение мелких безынерционных частиц крупностью 5...10 мкм маловероятно, т.к. их небольшая масса затрудняет преодоление энергетического барьера гидратных слоев на поверхности пузырька, и они относятся потоками жидкости, обтекающей пузырек, к его кормовой части, где и закрепляются. Это явление происходит благодаря турбулентным пульсациям скорости жидкости, возникающим в кормовой части пузырька, движущегося в турбулентном потоке. Поэтому одна из причин столкновения безынерционных частиц – мелко-масштабная турбулентность жидкости. При уменьшении масштаба турбулентных пульсаций число столкновений растет.

Существует критический размер частиц d_c , меньше которого частицы не могут соударяться с пузырьком за счет сил инерции [3]

$$d_c = \frac{18}{\sqrt{24}} \sqrt{\frac{\nu\mu}{g\Delta\rho d_{\Pi}}} = 37,4 \cdot 10^{-4} (\Delta\rho d_{\Pi})^{-1/2}, \quad (1)$$

где ν, μ – коэффициент кинематической и динамической вязкости жидкости; g – ускорение свободного падения; $\Delta\rho$ – разность плотностей минеральной частицы и жидкости; d_{Π} – диаметр пузырька.

Если диаметр частицы $d \geq d_c$, то возникает вероятность столкновения частицы с пузырьком (за счет силы инерции), которую можно определить по формуле Лэнгмюра:

$$P_c = Stk^2 / (Stk + 0,2)^2, \quad (2)$$

где $Stk = 2U_{\Pi} d^2 \Delta\rho / (9\mu d_{\Pi})$ – критерий Стокса; U_{Π} – скорость всплытия пузырька в неподвижной жидкости.

При $d \geq d_c$ частица сталкивается с пузырьком в результате эффекта зацепления и P_c зависит от режима обтекания потоками среды воздушного пузырька.

Ускорение свободного падения в выражении (1) – величина постоянная и не влияет на d_c , а центробежное ускорение в силовом поле гидроциклона – величина переменная, при увеличении которой критический размер частиц снижается, т.е. увеличивая инерционность частиц, центробежное поле сил снижает их минимальный размер и повышает вероятность столкновения с пузырьком.

Формула (1) дает приближенный результат, поскольку получена без учета гидродинамического взаимодействия поверхности пузырька и частицы, влияния пограничного слоя и турбулентности потока. Поэтому она и выражение (2) уточняются автором применительно к центробежному полю сил.

При турбулентно-аэрационной перемешке частицы и пузырьки движутся с переменными ускорениями, что увеличивает вероятность их столкновения за счет более близкого прохождения линий тока к обтекаемому телу, чем при ламинарном течении, обуславливая тем самым прилипание частиц к кормовой части пузырька в зоне завихрений, возникающих в гидродинамическом следе пузырьков. Поскольку минеральная частица большей плотности, чем водная среда, а пузырек воздуха меньшей плотности, чем вода, то они в турбулентном потоке получают ускорения разные по величине. Поэтому вероятность сближения пузырька и частицы возрастает. Для случая безынерционных частиц возможно их притяжение к пузырькам за счет диффузионно-электростатических сил, возникающих в зоне завихрений за движущимися пузырьками.

Взаимодействие между частицей и пузырьком определяется суммой гидродинамических F_G , электростатических $F_{\text{Э}}$, молекулярных F_M и архимедовых F_a сил. На расстоянии, примерно равном радиусу частицы, следует учитывать соотношения всех действующих сил, а при удалении от поверхности пузырька силами $F_{\text{Э}}$ и F_M можно пренебречь, а F_a – не учитывать из-за малых размеров и

Збагачення корисних копалин, 2014. – Вип. 58(99)-59(100)

Гравітаційна сепарація

плотности частиц.

При столкновении частиц с пузырьками вероятность их закрепления зависит от кинетической устойчивости гидратных слоев, которые утончаются до критической толщины или до толщины, меньше критической $(1-15)10^{-2}$ мкм. Прорыв гидратной прослойки легче всего происходит на острых гранях и выступах частицы.

Разрыв и удаление гидратной прослойки происходит со скоростью $1...20$ см/с и завершаются образованием трехфазного периметра смачивания, скорость распространения которого по Г. Шульцу и А. Шелудько определяется соотношением [3]

$$dr/dt = \alpha\sigma(\cos\theta_t - \cos\theta_0), \quad (3)$$

где α – подвижность трехфазного периметра (величина обратная коэффициенту трения); σ – поверхностное натяжение; θ_t – динамический краевой угол отекания; θ_0 – статический краевой угол.

Достижение высоких значений dr/dt (по измерениям Г. Шульца $10^{-2}...10^{-1}$ см/с) обеспечивается гидродробностью поверхности частицы и продолжительностью ее контакта с пузырьком воздуха. Время контакта изменяется в пределах $t = 0,08...1,5$ с и зависит от гидродробности поверхности частицы. Итак, из выражения (3) следует, что время необходимое для закрепления частицы при контакте с пузырьком, тем меньше, чем выше гидродробность поверхности и чем меньше размер частицы.

Вероятность закрепления с увеличением крупности частиц снижается, т.к. при этом возрастают отрывающие силы. Это способствует удалению из вторичной зоны разделения гидроциклона крупных частиц в пристенный слой пульпы и транспортировке их к песковой насадке. Мелкие частицы имеют большее время контакта (вследствие их скольжения по поверхности пузырька до его кормовой части) и поэтому возможность их закрепления выше. Очень мелкие частицы с малой инерцией и относительной скоростью в основном следуют с омывающими вихревыми потоками, препятствующими их прикреплению к пузырьку.

При прочих равных условиях закрепление воздушного пузырька на гидродробной поверхности частицы произойдет в том случае, если скорость движения и скорость деформации его поверхности при ударе о частицу имеют тот же порядок, что и скорость разрыва гидратной пленки.

В зоне турбулентно-аэрационной перемешки минеральных частиц крупномасштабные пульсации турбулентного потока образуются благодаря преодолению им вязких или рейнольдсовых напряжений. Перемещение этих крупных вихрей оказывается неустойчивым и порождает более мелкие вихри и так далее до мельчайших пульсаций, пока масштаб турбулентности не станет настолько малым, что вязкие напряжения будут преобладающими и кинетическая энергия начинает переходить в тепло. Вся энергия, передающаяся вдоль цепочки вихрей (включая и крупные), диссипирует.

Диссипация энергии определяется мощностью N , передаваемой при перемешивании единице массы пульпы m и превращаемой при торможении мелко-масштабных вихрей в тепло, т.е.

$$\bar{E} = N / m.$$

Связь между относительной скоростью пузырьков и частиц U_{OT} , их размерами и диссипацией энергии \bar{E} следующая [4]:

$$U_{OT} = 0,33 \frac{2\bar{E}^{-4/9} (R_{II} - R_T)^{7,9}}{\nu^{1/3}} \left(\frac{\rho_T - \rho_{Ж}}{\rho_{Ж}} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где R_{II} , R_T – радиус пузырька и частиц; ρ_T , $\rho_{Ж}$ – плотность частицы и жидкости.

Из уравнения (4) следует, что диаметр стабильных аэрофлокул (минерализованных пузырьков) при постоянной относительной скорости с ростом диссипации энергии уменьшается.

При $2 < U_{OT} < 10$ см/с вероятность сохранения закрепившейся на пузырьке частицы близка к единице, а при $U_{OT} > 17$ см/с пузырьки к частицам не прилипают.

Основными параметрами, характеризующими турбулентное течение во вторичной зоне разделения помимо числа Рейнольдса, скорости и степени аэрации потока, является интенсивность и масштаб турбулентности, частота турбулентных пульсаций, их распределение и характерные значения коэффициента диффузии твердых частиц и пузырьков в турбулентном потоке [5].

Минерализованные пузырьки движутся с изменяющимися скоростями по самым разнообразным траекториям, что приводит к появлению инерционных сил, отрывающих частицы от пузырьков. Вероятность такого отрыва тем выше, чем меньше прочность закрепления и больше крупность и плотность частиц. При этом на минерализованный пузырек действуют силы сжатия, разрыва и сдвига. Определяющей при равновесных краевых углах (менее 90°) является прочность на разрыв, а не прочность на сжатие и сдвиг.

Таким образом, во вторичной зоне разделения гидроциклона минерализованные пузырьки и частицы промпродуктовой фракции (мелко- и среднезернистые) доставляются радиальным потоком через раструб в эрлифтный трубный поток, а извлечение в него крупных и тяжелых частиц с повышением аэрированности среды (радиального потока), снижающей ее плотность, значительно уменьшается и они под действием центробежного поля сил перемещаются в пристенный слой пульпы и транспортируются к песковой насадке.

При этом гидрофильные и тяжелые (крупные) частицы по межпузырьковым каналам выводятся из вторичной зоны разделения нисходящим потоком, который соединяясь с внешним слоем пульпы, выводится через песковую насадку гидроциклона.

Эффективная работа гидроциклона [2] достигается выбором рациональных

Гравітаційна сепарація

параметров аэрирующего приспособления: глубины погружения, соотношения диаметра трубопроводов, концентрации твердой фазы, крупности минеральных частиц, контрастности их поверхностных свойств и др.

Взаимно однозначное соответствие между значениями производительности эрлифта по твердому и расходом воздуха определяет минимальную энергоемкость аэрирующего приспособления и рациональную технологию турбулентно-аэрационной перемешки минеральных зерен. В этой связи регулирование расхода сжатого воздуха является важным, поскольку его увеличение и уменьшение, по сравнению с оптимальным, ухудшает работу эрлифта. При его уменьшении резко снижается производительность эрлифта, а при увеличении – происходит выброс воздуха за пределы зоны разделения промпродуктовой фракции, что повышает удельный расход воздуха и снижает производительность эрлифта.

Список литературы

1. Кривошеков В.И. Обоснование и реализация турбулентно-аэрационной перемешки минеральных зерен в гидроциклоне // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 10(51). – С. 62-67.
2. А.с. 825146 СССР, МКИ ВОЗВ 5/34. Трехпродуктовый гидроциклон для обогащения полезных ископаемых / Н.Г. Бедрань, Н.А. Малецкий, В.И. Кривошеков. – Оpubл. 30.04.81. Бюл. № 16.
3. Мещеряков Н.Ф. Флотационные машины и аппараты. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
4. Schulze H.S., Gottschalk G. Untersuchungen zur hydrodynamischen Wechselwirkung feiner Gasblase mit einem Partikelschwarm bei der Flotation. 13 Int. Miner. Process Congr., Warszawa, 1979, Prep. Pap., V.1., Warszawa, 1979.
5. Кривошеков В.И. Определение коэффициента диффузии твердых частиц в турбулентном потоке пульпы // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 4(45). – С. 77-84.

© Кривошеков В.И., Медведева А.А., Шевченко А.А., 2014

*Надійшла до редколегії 23.11.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.О. Кіріченко*