

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА МАСЛЯНОЙ АГЛОМЕРАЦИИ МЕЛКИХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Метод селективной масляной агломерации мелких угольных частиц используется для интенсификации процесса флотации угольных шламов, т.к. в результате образования углемасляных агрегатов из частиц мелкого угля и капель масла происходит укрупнение частиц твердой фазы суспензии, что обеспечивает повышение скорости и эффективности флотационного процесса [1,2]. При этом наибольшее значение для флотации имеет агрегация самых мелких (менее 15-20 мкм), так называемых «безинерционных» частиц, которые при обычной флотации угля из-за низкой вероятности столкновений их с пузырьками воздуха очень медленно извлекаются в пенный продукт, а также отрицательно влияют на флотацию более крупных частиц. Поэтому селективное объединение одиночных микрочастиц угля в агрегаты повышает скорость их перевода в пенный продукт и улучшает условия флотации крупных угольных частиц.

При исследовании механизма процесса образования углемасляных комплексов определение гранулометрического состава дисперсной фазы водноугольной суспензии проводили с использованием метода фотоэлектрической седиментометрии [3], который прост и удобен при проведении измерений, исключает какое-либо механическое воздействие на суспензию и необходимость выделения отдельных фракций порошка и взвешивания их.

Этот метод основан на том, что пучок света, прошедший через мутную жидкую среду, уменьшает свою интенсивность по сравнению с чистой дисперсионной средой. При этом концентрация твердых частиц в

суспензии пропорциональна суммарной поверхности частиц, которая, в свою очередь, пропорциональна относительной оптической плотности суспензии. В таком случае по измерениям светового потока могут быть определены величины суммарных поверхностей супенсированных в жидкости частиц и их концентрации [3].

При перемешивании суспензии все частицы равномерно распределены по ее объему, и световой поток соответствует содержанию твердых частиц в ней. По окончании перемешивания через отрезок времени  $t_1$  часть частиц опустится ниже уровня светового потока на глубину  $H$ , при этом из зоны измерения полностью выйдут частицы крупностью  $+ d_1$ , для которых выполняется условие  $t_1 > H/V_{d1}$ , где  $V_{d1}$  – конечная скорость свободного падения в воде частиц крупностью  $d_1$ , рассчитываемая по формуле Стокса. Проведя измерения световых потоков через суспензию в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  получается ряд значений  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , с помощью которых определяется гранулометрический состав твердой фазы суспензии. Содержания узких фракций  $\beta_{d1}^{d2}$  частиц, размеры которых находятся в интервале от  $d_1$  до  $d_2$ , рассчитываются по формуле:

$$\beta_{d1}^{d2} = 100 d_{cp} (\lg T_1 - \lg T_2) / \\ d = d_{max} \\ / \sum d_{cp} (\lg T_i - \lg T_{i+1}), \\ d = 0 \quad (1)$$

где  $d_{cp}$  – средний размер частиц в классе, мкм.

Проверка пригодности метода фотоэлектрической седиментометрии для определения дисперсного состава мелкого

угля проведена путем расчета величины светового потока в дистиллированной воде  $T_{op}$  на основе результатов измерений величины световых потоков  $T_t$  при различных концентрациях твердого  $C$  в суспензии. Для двух суспензий с постоянным дисперсным составом твердой фазы и концентрациями твердого в них  $C_a$  и  $C_b$  справедливо уравнение:

$$\lg T_{op} = \\ = (\lg T_1 - \lg T_2) / (k - 1) + \lg T_1, \quad (2)$$

где  $k = C_b/C_a$ .

При равенстве величины светового потока, измеренного в чистой дисперсионной среде  $T_{o2}$ , и значения  $T_{op}$ , рассчитанного по уравнению (2), данная методика может быть использована для определения дисперсного состава.

Для проверки равенства  $T_{o2} = T_{op}$  проведены измерения величины световых потоков на приборе КФК-2 в кювете толщиной 10 мм с использованием светофильтра с длиной волны максимального пропускания 750 нм. Для приготовления суспензии в качестве дисперсной фазы использовали измельченный уголь марки КС крупностью – 100 мкм и зольностью  $A^d=4,7\%$ . Суспензии с различным содержанием дисперсной фазы получены путем разбавления исходной суспензии. Перед началом измерений кювета закрывалась стеклянной пластинкой и многократно переворачивалась. Высота уровня суспензии в кювете во всех опытах поддерживалась постоянной. Измерения проводились при чувствительности прибора, соответствующей световому потоку в чистой дистиллированной воде  $T_{o2} = 296$ .

Статистическая обработка

Таблица 1  
Границные размеры частиц  $d$  при времени осаждения  $t$

$t, \text{ с}$	15	30	60	120	180	300	420	600	900
$d, \text{ мкм}$	74,0	56,0	37,0	25,1	17,5	9,5	4,9	2,4	1,1

выборки из 24 расчетных значений  $T_{op}$ , полученных по результатам измерений  $T_t$  при четырех значениях  $k$  показала: среднее значение выборки  $\bar{T}_{op}=297,1$ ; выборочная дисперсия результатов  $S^2=6,79$ . Проверка гипотезы о равенстве  $T_{os}=T_{op}$ , проведенная с использованием  $t$ -критерия Стьюдента, позволила установить справедливость гипотезы при уровне значимости  $\alpha=0,95$ . Это свидетельствует о применимости данного метода анализа для определения дисперсного состава угольных частиц.

При исследовании процесса масляной агломерации методика определения гранулометрического состава угля заключает-

размеров частиц  $d_t$ , соответствующие времени осаждения  $t$  их в кювете, рассчитанные по формуле Стокса, приведены в табл. 1.

Для статистической оценки результатов определения дисперсного состава угля проведены параллельные измерения в следующих условиях: содержание твердого в суспензии  $C=80 \text{ г/л}$ ; скорость вращения мешалки  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ ; дисперсионная среда – дистиллированная вода, дисперсная фаза – уголь марки КС крупностью – 100 мкм и зольностью  $A^d=4,7\%$ . Перед измерениями каждая проба суспензии разбавлялась водой в 100 раз. Содержания узких классов частиц угля, рассчитан-

ние частиц крупностью от 0 до 9,5 мкм получено суммированием содержания четырех узких классов. Полученная таким образом новая экспериментальная выборка имеет меньшую дисперсию результатов и подчиняется закону нормального распределения ошибок. Это объясняется тем, что точность определения дисперсного состава повышается с уменьшением диапазона размеров частиц в классах, т.к. положенная в основу методики связь между массой и поверхностью частицы становится более тесной со сближением границ фракций.

Точность и воспроизводимость результатов измерений в значительной мере зависит от условий отбора пробы и ее представительности. На представительность пробы, отбираемой из перемешиваемой суспензии, оказывают влияние такие факторы, как место отбора пробы, крупность и содержание частиц твердой фазы в сус-

Гранулометрический состав угля по результатам параллельных опытов

Классы, мкм	Содержание узких классов $\beta$ в пробах, %								$\bar{\beta}, \%$	$S^2$	$A/\Delta A$	$E/\Delta E$
	1	2	3	4	5	6	7	8				
0-9,5	16,95	13,66	14,16	13,00	16,28	13,58	11,78	17,77	14,65	4,43	0,02	-0,94
9,5-17,5	7,26	9,14	6,24	7,37	5,10	6,15	6,02	5,93	6,65	1,54	0,71	-1,84
17,5-37,0	13,48	16,28	16,46	14,73	16,11	14,95	16,75	9,25	14,75	6,15	-0,04	-0,67
37,0-56,0	13,91	12,51	12,12	12,52	16,93	17,59	15,23	15,60	14,55	4,44	0,01	-0,94
56,0-100,0	48,40	48,42	51,02	52,38	45,57	47,73	50,22	51,45	49,40	5,12	-0,01	-0,81

ся в следующем.

Навеска исходного угля замачивается в дистиллированной воде в течение 30 минут при непрерывном перемешивании механической мешалкой. При фиксированной скорости вращения мешалки из определенной точки камеры агломерации с помощью пипетки отбирается проба суспензии постоянного объема и переносится (или предварительно разбавляется водой до необходимой концентрации) в измерительную кювету. Измерение величины светового потока проводится в строго фиксированные моменты времени  $t$ . Значения граничных

значений по формуле (1), и дисперсии результатов  $S^2$  приведены в табл. 2.

Для количественной оценки степени отклонения экспериментальной кривой распределения от закона нормального распределения рассчитаны показатели асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$ , а также средние погрешности этих показателей  $A/\Delta A$  и  $E/\Delta E$ . При значениях  $A/\Delta A$  и  $E/\Delta E$  менее трех (табл. 2) можно считать, что экспериментальные данные подчиняются нормальному закону распределения случайных ошибок [4].

Необходимо отметить, что приведенное в табл. 2 содержа-

щее по формуле (1), и дисперсии результатов  $S^2$  приведены в табл. 2.

Установлено, что при перемешивании суспензии турбинной мешалкой диаметром 34 мм в литровой цилиндрической камере с четырьмя отражательными перегородками отбор проб необходимо проводить в следующих условиях:

- скорость вращения мешалки в момент отбора проб должна находиться в диапазоне от 1500 до 6000 об/мин;
- каждая аналитическая проба должна состоять как минимум из трех разовых проб;
- место отбора пробы должно быть постоянным и нахо-

Содержание узких классов частиц угля в зависимости от времени перемешивания суспензии

Крупность частиц угля, мкм	Содержание частиц угля, %									
	Время перемешивания, мин									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-100+37	8,47	5,81	5,53	4,67	4,56	4,10	4,09	4,08	4,02	3,95
-37+10	30,11	28,72	28,47	28,06	27,66	27,17	27,25	26,81	26,39	26,86
-10+0	61,42	65,46	66,00	67,26	67,78	68,73	68,66	69,10	69,60	69,18

диться на глубине 0,5 высоты уровня пульпы в камере и на расстоянии 0,5 радиуса от стеки камеры;

- увеличение содержания твердого в исходной суспензии до 250 г/л при крупности шлама менее 0,5 мм не влияет на точность отбора пробы.

Для количественной оценки эффективности процесса агломерации в качестве основных показателей использовались содержание узких классов частиц в анализируемой пробе и степень их агломерации. Степень агломерации узкого класса частиц  $Ag_t^d$  в момент времени  $t$  после начала перемешивания суспензии определялась по формуле:

$$Ag_t^d = (\beta_u^d - \beta_t^d) / \beta_u^d,$$

где  $\beta_u^d$  и  $\beta_t^d$  - содержание узких классов частиц соответственно в начальный момент времени и в момент  $t$ .

Методика определения дисперсного состава мелкого угля использована при изучении кинетики образования углемасляных агрегатов в процессе перемешивания водо-угольной суспензии. Пять параллельных опытов проведены в следующих условиях: содержание твердого – 80 г/л; скорость вращения мешалки – 3500 мин<sup>-1</sup>; расход реагентов: термогазоль – 2 кг/т, КЭТГОЛ – 0,1 кг/т; твердая фаза – измельченный уголь марки КС крупностью – 100 мкм.

Из приведенных в табл. 3 результатов видно, что с увеличением времени перемешивания содержание мелких классов угля (0-10 и 10-37 мкм) в суспензии уменьшается, а крупных

(+37 мкм) - увеличивается. Максимальная степень агломерации достигается у самых мелких частиц угля, а у крупных частиц – она отрицательная (рисунок), т.к. за счет укрупнения мелких частиц количество крупных частиц увеличивается.

Основное изменение дисперсного состава угля в суспензии происходит в начальные 5 минут процесса агломерации, а после 10 минут состояние дисперсной системы фактически стабилизируется. Такой характер процесса агломерации объясняется тем, что при перемешивании суспензии одновременно происходит образование и разрушение углемасляных агрегатов. Скорость процесса образования агрегатов пропорциональна количеству столкновений микрочастиц угля с каплями масла, которое характеризуется выражением [5]:

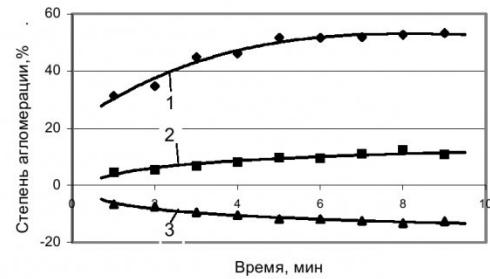
$$N = \frac{\rho}{\rho_0} n_0^2 \frac{\varepsilon_0^{3/4}}{v^{5/4}} \bar{d}^4,$$

где  $n_0$  – число частиц в единице объема,  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотность соответственно частиц и жидкости;  $\varepsilon_0$  – диссипации энергии;  $v$  – кинематическая вязкость;  $\bar{d}$  – средний размер частиц.

В ходе процесса агломерации в суспензии увеличивается количество углемасляных образований, а число одиночных частиц угля и свободных капель масла уменьшается, что приводит к снижению числа столкновений и скорости образования агрегатов. Обратный характер должна иметь кинетическая зависимость скорости разрушения

углесасляных комплексов, которая, при постоянной величине диссипации энергии, растет с увеличением количества образовавшихся агрегатов. При выравнивании скоростей этих процессов в суспензии устанавливается равновесие, и степень агломерации частиц с этого момента практически не меняется.

Степень агломерации микрочастиц угля в состоянии равновесия и время достижения этого состояния зависят от мно-



Кинетические кривые процесса агломерации частиц угля крупностью: 1 – 0-10 мкм, 2 – 10-37 мкм, 3 – 37-100 мкм.

гих факторов: расхода и типа масляного реагента, гранулометрического состава и содержания частиц угля в суспензии, скорости вращения мешалки и др. Оценка влияния этих факторов на изменение дисперсного состава угольных частиц дает возможность установить основные закономерности процесса масляной агломерации и целенаправленно воздействовать на него.

Таким образом, методика определения дисперсного состава твердой фазы водо-угольной суспензии позволяет изучить механизм процессов образования и разрушения углемасляных агрегатов и на научной основе управлять процессом масляной агломерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейн М.С. Селективная сепарация по смачиваемости мелких угольных и породных частиц // Проблемы ускорения научно-технического прогресса в отраслях горного производства: Материалы Международной научно-практической конференции. –М.: ННЦ ГП – ИГД им. А.А.Скочинского, 2003. С. 385-392.
2. Клейн М.С., Байченко А.А., Почевалова Е.В. Обогащение и обезвоживание тонких угольных шламов с использованием метода масляной грануляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 4. С. 237-239.
3. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. –Л.: Химия, 1974. 280 с.
4. Практикум по обогащению полезных ископаемых: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. Н.Г. Бедраня. –М.: Недра, 1991. 526 с.
5. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. -М.: Издат. физ.-мат. литер. 1959. 700 с.

Автор статьи:

Клейн  
Михаил Симхович  
- канд.техн.наук, доцент  
кафедры «Обогащение полезных  
ископаемых»