

УДК 622.75

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук,

П.О. ЧЕЧЕЛЬ

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

А.В. ФЕДОРОВ,

С.А. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук

(Украина, Павлоград, ЦОФ "Павлоградская")

КИНЕТИКА ШЛАМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ НА ЦОФ "ПАВЛОГРАДСКАЯ"

Первичные шламы образуются при добыче каменных углей и удаляются в подготовительных операциях, поэтому существенно не влияют на основные процессы обогащения.

Большое влияние на реологические свойства оборотной воды и суспензий оказывают, так называемые, вторичные шламы, образование которых происходит вследствие механического взаимодействия угольных и породных частиц между собой и с поверхностями обогатительных и транспортирующих устройств. Существенную роль при этом играет интенсивность размокания компонентов угольной породы, содержащих глину.

Интенсивность процесса размокания вмещающих пород, часть которых при добыче попадает в уголь, зависит от их физических свойств и состояния, разрушающего действия воды и величины механического воздействия на породу при ее пребывании в технологических процессах обогащения, а также продолжительности размокания.

Разрушающая способность воды зависит от ее расхода, скорости перемещения и температуры. Вода также растворяет некоторые соли, входящие в состав вмещающих пород, повышая их размокаемость.

Физические свойства вмещающих пород существенно зависят от количества глинистых минералов.

Вмещающими породами углей Западного Донбасса, которые перерабатываются на ЦОФ "Павлоградская", в основном представлены аргиллитами и алевролитами. Заметное содержание в этих породах каолинита. Гидрослюда и монтмориллонит имеют подчиненное значение. При мокром обогащении глинистая составляющая породы диспергирует, насыщая технологическую воду илистыми частицами.

Вторичные шламы образуются, главным образом, при касательных напряжениях, возникающих на поверхности кусков угля или породы вследствие трения. При этом протекают два независимых процесса: разрушение имеющихся на поверхности кусков выступов, создающих ее шероховатость (первичное истирание), и истирание образующейся гладкой поверхности (вторичное истирание). Оба эти процесса приводят к образованию тонкодисперсных частиц, именуемых шламами.

Вопрос об определении граничной крупности, менее которой частицы угля относят к шламам, формально определяется исходя из особенностей используемых технологий их обогащения. Например, во многих случаях считается, что эта граничная крупность соответствует минимальному размеру частиц, эффективно сепарируемых гравитационными методами, либо верхнему пределу крупности продуктов для последующих процессов, например, для флотации. Однако с точки зрения механизма шламообразования, шламами следует считать такие частицы, которые уже сами не способны образовывать новые шламы. Вместе с тем, для кинетики шламообразования вопрос о граничной крупности шламов не является принципиальным.

Особенность первичного истирания, т.е. разрушение выступов на поверхности кусков, состоит в том, что количество шламов dm , образующихся за время dt , пропорционально величине шероховатой поверхности S и зависит от высоты выступов δ_1 и физико-механических свойств материала куска, характеризующихся некоторой константой k_1 и его плотностью ρ , т.е.

$$dm = -k_1 \delta_1 \varphi_1 \rho S dt . \quad (1)$$

Величина шероховатой поверхности пропорциональна массе частиц, из которых, при дальнейшем развитии процесса, образуются шламы, т.е. $S = m / (\delta_1 \varphi_1 \rho)$, где φ_1 – объемная доля выступов в поверхностном слое.

При подстановке выражения для площади шероховатой поверхности в уравнение (1) и его решении при начальных условиях $t = 0; m = m_0$ получаем массу образовавшихся шламов:

$$m_s = m_0 (1 - e^{-k_1 t}) . \quad (2)$$

Скорость образования шламов при этом составит:

$$\frac{dm_s}{dt} = k_1 m_0 e^{-k_1 t} . \quad (3)$$

$$m_0 = S_0 \delta_1 \varphi_1 \delta ,$$

где $S_0 = K_s \pi d^2$ – боковая поверхность куска, d – его эквивалентный диаметр, K_s – коэффициент, учитывающий отклонение формы куска от сферической.

Выход образовавшихся шламов по отношению к массе куска составит:

$$\gamma_s = \frac{6 K_s \delta_1 \varphi_1}{d} (1 - e^{-k_1 t}) = \delta_1 \varphi_1 s (1 - e^{-k_1 t}) , \quad (4)$$

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

где s – удельная поверхность шламообразующих кусков, m^{-1} .

Тогда скорость образования шламов:

$$\frac{d\gamma_s}{dt} = k_1 \delta_1 \varphi_1 s e^{-k_1 t} . \quad (5)$$

Полученные уравнения (4) и (5) для отдельного шламообразующего куска в равной мере относятся и к полидисперсному материалу. Его удельная поверхность может быть определена по существующим методикам с использованием гранулометрического состава. Кроме величины удельной поверхности, процесс шламообразования определяется параметрами k_1 , δ_1 , φ_1 , характерными для каждого вида шламообразующих поверхностей, например, фракций плотности угля.

Наряду с процессом шламообразования за счет разрушения выступов происходит вторичное истирание. Этот процесс, по аналогии с первичным истиранием, характеризуется параметрами k_2 , δ_2 , φ_2 , однако они имеют уже другие значения, поскольку скорость шламообразования здесь значительно ниже из-за меньшей величины шероховатости δ_2 . Количество шламов, образующихся за время dt пропорционально значениям вышеприведенных параметров, а также величине шламообразующей поверхности S , сглаженной за счет разрушения относительно грубых выступов:

$$dm_s = k_2 \delta_2 \varphi_2 \rho S dt , \quad (6)$$

Поскольку величина шламообразующей поверхности при истирании куска согласно уравнению (1) определяется выражением $S = S_0(1 - e^{-k_1 t})$, то при допущении, что S уменьшается незначительно при уменьшении объема куска, решением уравнения (6) при начальных условиях: $t = 0, m_s = 0$ и после деления на массу куска будет выход шламов при вторичном истирании:

$$\gamma_s = k_2 \delta_2 \varphi_2 s \left[t - \frac{1}{k_1} (1 - e^{-k_1 t}) \right] . \quad (7)$$

Поскольку, как уже указывалось выше, процесс первичного истирания идет независимо от вторичного, то суммарный выход шламов за счет истирания равен сумме уравнений (4) и (7):

$$\gamma_s = s \left(\delta_1 \varphi_1 - \frac{k_2}{k_1} \delta_2 \varphi_2 + k_2 \delta_2 \varphi_2 t \right) (1 - e^{-k_1 t}) , \quad (8)$$

а скорость их образования (с учетом независимости процесса первичного истирания):

$$\frac{d\gamma_s}{dt} = s \left[k_1 \delta_1 \varphi_1 e^{-k_1 t} + k_2 \delta_2 \varphi_2 (1 - e^{-k_1 t}) \right]. \quad (9)$$

Из последнего уравнения следует, что скорость шламообразования пропорциональна удельной боковой поверхности истираемых кусков и имеет максимальное значение в начале процесса, убывая с течением времени, и достигает предела $sk_2\delta_2\varphi$ при времени процесса, стремящемся к бесконечности. Процессов истирания (первичного и вторичного) характеризуется константами скорости истирания k , определяемыми характером механических воздействий на куски угля и их физико-механическими свойствами, а также произведениями величин шероховатости и объемных долей выступов в поверхностном (шламообразующем) слое λ . Таким образом, процесс шламообразования может быть охарактеризован четырьмя константами: $k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2$, определение которых является задачей изучения кинетики шламообразования. В одинаковых условиях шламообразования материала с данными физико-механическими свойствами при первичном и вторичном истирании, следует полагать, что константы скорости шламообразования для обоих этих процессов одинаковы.

Уравнение (9) при предположении равенства констант скорости шламообразования при первичном и вторичном истирании может быть приведено к виду:

$$\frac{d\gamma}{dt} = k \left[e^{-kt} (a - b) + b \right], \quad (10)$$

где $a = s\delta_1\varphi_1$; $b = s\delta_2\varphi_2$.

При первичном истирании образуются шламы крупностью до 0,7 мм, а при вторичном истирании – тонкодисперсные шламы крупностью до 50 мкм.

Поскольку $a \gg b$, то для нахождения параметров уравнения кинетики шламообразования, можно пользоваться приближенной зависимостью:

$$\frac{d\gamma}{dt} = k(ae^{-kt} + b). \quad (11)$$

Интегрирование уравнения (11) дает зависимость выхода шламов от времени обработки:

$$\gamma = ka \int_0^t e^{-kt} dt + kb \int_0^t dt = a(1 - e^{-kt}) + kbt. \quad (12)$$

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Анализ полученного уравнения показывает, что при значении показателя экспоненты > 3 , зависимость превращается в линейную, т.е.

$$\gamma = a + kbt . \quad (13)$$

Параметры, определяющие кинетику шламообразования, являются специфическими для каждой марки угля, его фракций плотности и для угольной породы, поэтому полученная модель может быть основой для разработки методики оценки шламообразования с целью составления банка данных, который может быть использован при проектировании технологий углеобогащения и компьютерных методах управления ими.

Поскольку интенсивность образования шламов определяется физико-механическими свойствами угольных, промежуточных и породных фракций и удельной поверхностью шламообразующего материала, зависящей от его крупности, то, вводя коэффициенты шламообразования j -х фракций плотности в i -х классах крупности Ψ_{ij} , показывающих долю фракции плотности, перешедшую в шламы, имеем:

– выхода фракций в машинных классах:

$$\gamma_j^n = \sum_{i=n_1}^{n+1} E_i(d) \gamma_{ij} (1 - \psi_{ij}), \quad (14)$$

$$\gamma_j^n = \sum_{j=1}^{m+1} [1 - E_i(d)] \gamma_{ij} (1 - \psi_{ij}); \quad (15)$$

– зольности этих фракций:

$$A_j^n = \frac{1}{\gamma_j^n} \sum_{i=n_1}^{n+1} E_i(d) \gamma_{ij} A_{ij}^d (1 - \psi_{ij}), \quad (16)$$

$$A_j^n = \frac{1}{\gamma_i^n} \sum_{i=n_1}^{n+1} [1 - E_i(d)] \gamma_{ij} A_{ij}^d (1 - \psi_{ij}). \quad (17)$$

где n_1 – порядковый номер шламообразующего класса крупности. В практике углеобогащения – это обычно класс крупности $> 0,5$ мм.

Выход вторичных шламов i -м классе крупности:

$$\gamma_{u2i} = \sum_{j=1}^{m+1} \gamma_{ij} \psi_{ij} , \quad (18)$$

ИХ ЗОЛЬНОСТЬ

$$A_{u2i}^d = \frac{1}{\gamma_{u2i}} \sum_{j=1}^{m+1} \gamma_{ij} A_{ij}^d \psi_{ij} . \quad (19)$$

Выход γ_{u1} и зольность A_{u1}^d первичных шламов определяются их балансом при подготовительном грохочении. Тогда выход и зольность суммарных шламов в машинном классе составят:

$$\gamma^u = \gamma_{u1i} + \gamma_{u2i} , \quad (20)$$

$$A_{ui}^d = \frac{1}{\gamma_i^u} (\gamma_{u1i} A_{u1i}^d + \gamma_{u2i} A_{u2i}^d) . \quad (21)$$

Исследования кинетики процесса шламообразования выполнялось в динамических условиях путем моделирования механических воздействий в водной среде на рядовой уголь ЦОФ "Павлоградская". В исследованиях принята методика, используемая в институтах КузНИИУглеобогащение и ИОТТ [1-4].

Для изучения кинетики шламообразования использовалась барабанная лабораторная шаровая мельница без измельчающей среды (шаровой загрузки), с диаметром барабана 300 мм, его длиной 215 мм, его объемом 15 л и частотой вращения 64,7 об/мин.

В барабан мельницы без измельчающей среды (шаров) загружался исследуемый материал и добавлялась вода. Объем материала и воды, исходя из обеспечения механики перемещения кусков угля, должен составлять не более 50% объема барабана. Соотношение угля и воды должно составлять 1:1.

Вращение барабана осуществлялось при горизонтальном расположении его оси. Через определенное время (в опытах принято 5 мин), барабан останавливали, его содержимое выгружали и отделяли с помощью сита класс крупности < 1 мм, который считали шламами.

После отделения шламов, остаток пробы вновь загружали в мельницу и продолжали обрабатывать уголь при тех же условиях, что были в начале исследований. Такие циклы повторяли, пока суммарное время обработки угля не составило 30 мин. Такой предел обеспечивает гарантию учета всех возможных вариантов пребывания продуктов углеобогащения в аппаратах мокрого обогащения.

Гранулометрический и фракционный составы пробы углей, поступающих для переработки на ЦОФ "Павлоградская", показаны в табл. 1.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Таблиця 1

Гранулометрический и фракционный составы шихты углей, поступающих на ЦОФ "Павлоградская" в 2017 году

δ , кг/м ³	γ , %	A^d , %	S , %	γ , %	A^d , %	S , %	γ , %	A^d , %	S , %
	Класс крупности +13 мм			Класс крупности 1-13 мм			Класс крупности 0-1 мм		
<1500	18,58	5,07	1,55	27,35	6,38	1,36			
1500-1800	0,70	40,20	4,54	1,45	32,93	2,84			
>1800	15,86	84,14	1,22	19,27	83,15	1,37			
Итого	35,14	41,43	1,46	48,07	37,96	1,41	16,78	49,52	1,33
Всего							100,00	41,12	1,41

В результате статистической обработки результатов изучения кинетики шламообразования по вышеуказанной методике (табл. 2-4) получены уравнения линий тренда для различных классов крупности и фракций угля, перерабатываемого в настоящее время на ЦОФ "Павлоградская" (табл. 5).

Таблиця 2

Сводная таблица показателей шламообразования класса +13 мм

Время обработки, мин	Уголь класса +13 мм		Порода класса +13 мм		Всего шламов от класса +13 мм	
	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %
5	2,46	24,40	10,25	87,20	7,22	78,87
10	3,62	21,55	23,57	88,56	15,80	82,58
15	4,34	20,48	33,87	88,84	22,37	83,68
20	5,43	18,77	43,01	89,34	28,38	84,09
25	6,11	17,52	49,76	89,58	32,77	84,35
30	6,52	16,97	56,84	89,62	37,25	84,67
Итого ^{*)}	38,93		61,07			

^{*)} Выход угольной и породной фракций в исходной пробе класса +13 мм

Таблиця 3

Сводная таблица показателей шламообразования класса 1-13 мм

Время, мин	Уголь класса 7-13 мм		Порода класса 7-13 мм		Класс 3-7 мм		Класс 1-3 мм		Всего от класса 1-13 мм	
	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %	γ , %	A^d , %
5	2,26	56,00	24,36	87,00	12,93	79,50	15,63	77,00	13,36	78,99
10	2,71	52,40	51,34	89,21	18,15	82,00	6,84	83,30	13,98	84,14
15	3,04	49,87	64,07	89,46	21,05	82,58	4,05	82,50	14,99	84,59
20	3,29	48,55	70,21	89,53	22,73	82,83	1,95	85,50	15,25	85,01
25	3,52	47,39	74,60	89,46	24,03	82,90	1,45	84,60	15,90	84,91
30	3,71	46,38	77,35	89,44	24,97	82,85	1,00	85,00	16,29	84,82
Итого: ^{**)}	18,92		11,13		26,18		43,77			

^{**) Выход данного класса крупности в исходной пробе класса +13 мм}

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Таблиця 4

Сводная таблица показателей шламообразования рядового угля
(без первичных шламов)

Время, мин	γ , %	A^d , %
5	8,96	78,96
10	12,27	83,44
15	15,07	84,12
20	17,30	84,48
25	19,16	84,57
30	20,92	84,73

Таблиця 5

Результаты исследований кинетики исследований шламообразования
на ЦОФ "Павлоградская" в зависимости от времени обработки t (мин)

Крупность, мм	Фракция	Выход, %	Зольность, %
>13	угольная породная	$\gamma = -0,0057t^2 + 0,3746t + 0,2878$	$A^d = 0,0077t^2 - 0,5602t + 26,836$
		$\gamma = -0,0324t^2 + 2,9678t - 3,4153$	$A^d = -0,0048t^2 + 0,2591t + 86,159$
7-13	угольная породная	$\gamma = -0,0012t^2 + 0,0988t + 1,8147$	$A^d = 0,0132t^2 - 0,8299t + 59,62$;
		$\gamma = -0,1104t^2 + 5,8123t + 0,4717$	$A^d = -0,0089t^2 + 0,3856t + 85,64$
3-7	уголь	$\gamma = -0,4966x^2 + 5,7483x + 8,0541$	$A^d = 0,6508x^2 - 7,9326x + 93,948$
1-3	уголь	$\gamma = -0,0496t^2 + 2,3988t + 2,1391$	$A^d = -0,0072t^2 + 0,3677t + 75,563$

Для сводных показателей шламообразования рядового угля установлены следующие зависимости от времени обработки продукта (без первичных шламов):

- выход шламов $\gamma = -0,0211t^2 + 1,3613t + 1,092$;
- коэффициент надежности аппроксимации $R^2 = 0,9873$;
- зольность шламов $A^d = -0,0166t^2 + 0,7697t + 76,153$;
- коэффициент надежности аппроксимации $R^2 = 0,9049$.

При увеличении длительности обработки угля и постоянном росте количества шламов, содержание класса -0,04 мм в шламах практически не меняется. Зольность этого класса высока (более 80%), незначительный рост которой имеет место при увеличении продолжительности обработки.

Фракционный анализ шламов показал, что в классе крупности 0,04-1 мм содержится небольшое количество угольной фракции с зольностью 6,2% при выходе 8% и 6% промежуточной фракции при выходе 6%. В целом, этот класс крупности представлен породной фракцией +1800 кг/м³ с выходом 86% и зольностью 89,1%. Такая смесь фракций является труднообогатимой и технологического успеха не предвещает.

Класс -0,04 мм представлен исключительно породной фракцией с зольностью 84,16%. Обнаружены лишь следы промежуточной фракции.

Установленная зависимость выхода шламов от времени $\gamma(t)$ позволяет оценить скорость шламообразования $\frac{d\gamma}{dt}$:

- порода класса +13 мм – 1,83%/мин.;

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

- порода класу 7-13 мм – 1,95%/мин.;
- уголь класу +13 мм – 0,17%/мин.;
- уголь класу 7-13 мм – 0,057%/мин.

Т.е. швидкість утворення шламу з породних фракцій приблизно в 10 раз (для класу +13 мм) і в 30 раз (для класу +7-13 мм) перевищує швидкість утворення шламу з вугільних фракцій.

З порівняння швидкостей шламоутворення суміші фракцій випливає, що наведений вихід шламу має більшу швидкість наростання для малих класів крупності. Винятком є класи крупності +13 мм і 7-13 мм. Це пояснюється співвідношенням легко розмокаємої і легко шламуючої породи і вугля. Так, в класі крупності +13 мм співвідношення маси вугля/порода становить 39/61, а в класі крупності 7-13 мм це співвідношення дорівнює 63/37.

Шламоутворення породних фракцій є аномальним в зв'язі з інтенсивним розмоканням входять в породу аргилітів і алевролітів. Швидкість шламоутворення породних фракцій в декілька десятків раз перевищує швидкість шламоутворення вугільних фракцій.

Отримані результати підтверджують рівняння кінетики накоплення шламу (12) і (13), оскільки слагаєме, включає експоненту, перетворюється в константу a при достатньому великому часі обробки вугля, а залежність (12) перетворюється в лінійну (13).

Встановлено, що утворені шлами є високозольними. Їх зольність збільшенням часу обробки зростає за рахунок більш інтенсивного шламоутворення породних фракцій і їх подальша переробка економічно нецелесообразна через незначний вміст вугільної фракції (близько 1% при зольності більше 80%). Тому даний продукт, особливо його ілистий частинка (клас крупності -0,04 мм з виходом 8...10% від класу +1 мм і зольністю більше 80%) цілком виправдані, по мірі його утворення, виводити з технологічних процесів і, після його кондиціонування по вологості, депонувати в отвалах.

Список літератури

1. Угли Західного Донбасу / А.П. Бубнов, А.І. Денисенко, В.І. Кармазін і др. – М.: Недра, 1971.
2. Карташова Л.П. Дослідження і розробка методики прогнозування шламоутворення в процесі збагачення вугілля: Автореф. дисс. ... к.т.н. ІОТТ. – М., 1975.
3. Серго Е.Е. Промивка руд чорних металів. – М.: Госгортехіздат, 1963.
4. Серго Е.Е. Методика прогнозування процесу розмокання бокових порід шахт Західного Донбасу. – Д.: Дніпропетровський гірний інститут, 1988.

© Пилов П.І., Чечель П.О., Федоров А.В., Гончаров С.А., 2017

Надійшла до редколегії 14.09.2017 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким