© Ю.Б. Рубинштейн, Е.К. Самойлова, 2008

УДК 622.7

Ю.Б. Рубинштейн, Е.К. Самойлова

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЗОЛЫ УНОСА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Семинар № 25

При нынешних темпах добычи запасы угля оцениваются на более чем 200 лет. По последним оценкам запасы угля составляют 950000 млн т Запасами угля обладают практически все страны, извлекаемыми запасами - порядка 70 стран. Крупнейшими запасами обладают США, Россия и Китай.

Уголь удовлетворяет свыше 23 % процентов мировой потребности в энергии. Зола-унос электростанций является распространенным промыш-ленным отходом. С 2000 года во всем мире ежегодно получается более 390 млн т этого отхода, при этом объем ее утилизации составляет менее 15 %.

Россия обладает вторыми в мире разведанными запасами угля. Ежегодно Российская угольная энергетика производит более 75 млн т. золы и шлаковых отходов, из которых утилизируется приблизительно 11 %, в основном в виде вторичных стройматериалов. Для улучшения экологических свойств бетона представляется целесообразным частичная замена портландцемента различными промышленными отходами, и, в том числе, золой уноса. К настоящему времени разработан состав бетона с высоким содержанием золы уноса, в котором на долю портландцемента приходится всего 40 % и который характеризуется высокими прочностными показателями и повышенной долговечностью.

Проведенные многочисленные исследования в России и за рубежом показали, что в золе и шлаках ТЭС содержится ряд компонентов, которые обладают ценными, а в ряде случаев уникальными технологическими свойствами и могут быть использованы во многих современных технологиях в различных отраслях промышленности. Отсутствие систематизированных данных о составе, физических и технологических свойствах этих компонентов в зависимости от типа и качества сжигаемых углей различных месторождений, а также отсутствие эффективных технологий их выделения из золошлаковых отходов сдерживает их широкое использование.

Количество золы, удовлетворяющей требованиям ее использования, всегда ограничено на рынке. Характеристики золы для производства стройматериалов или других товарных продуктов требуют улучшения. Считается, что характеристики материалов, ранее классифицируемые как отходы, могут быть улучшены путем их обогащения.

Целью данных исследований являлось установление возможности флотационного выделения из зольных отходов электростанций органической составляющей и доведение содержания LOI (несгоревшего угольного остатка) до 2-3 % в минеральной части, являющейся сырьем для стройиндустрии.

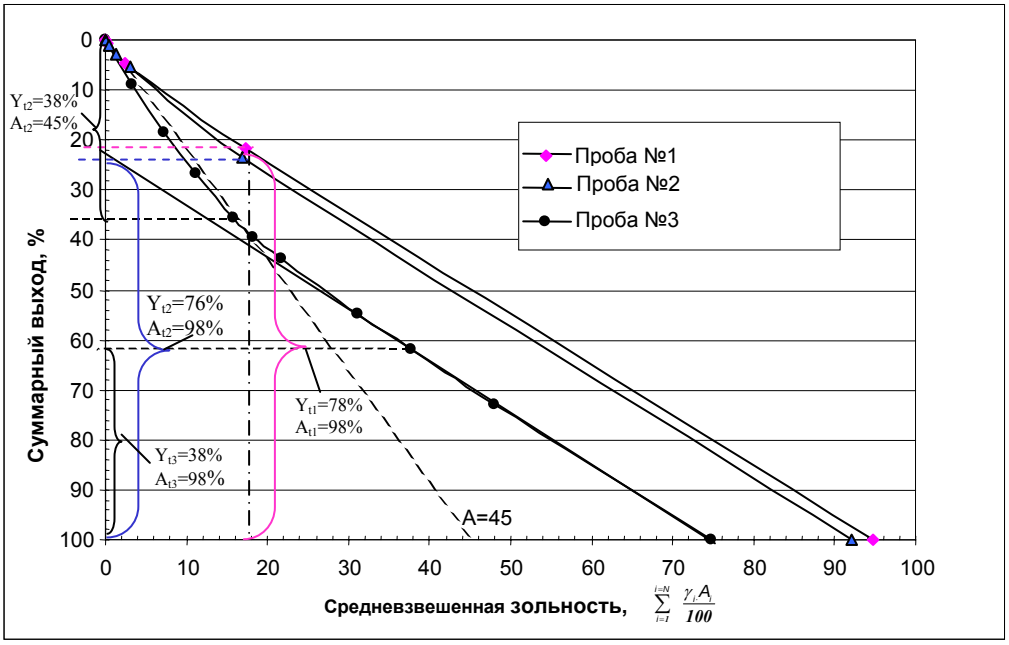


Рис. 1. Кривые предельной флотирумости исследуемых проб зола уноса

Для исследований были представлены 2 пробы золы унос электростанции с содержанием LOI = 6-7 % (пробы № 1 и 2) и проба с содержанием LOI>20 % (проба №3).

При использовании технологии пылевидного сжигания угля, зола унос ТЭС по гранулометрической характеристике представляет собой тонкодисперсный материал крупностью менее 200 мкм. В пробах №1 и №2 практически отсутствуют частицы крупностью более 0,2 мм, в пробе №3 их количество составляет порядка 5 %. Содержание частиц крупностью более 100 мкм составляет 18, 10,7 и 23,8 %, а их зольность – 81,6; 67,7 и 32,5 %, соответственно для проб №1, №2 и №3. Основная масса частиц во всех пробах представлена классом 0-0,05 мм, зольность которого для проб №1 и №2 составляет порядка 94-95 %, а для пробы №3 – 87 %. Что говорит о существенном недожоге в пробе №3 (таблица).

В исследуемых пробах при центрифугальном фракционном анализе не удалось выделить фракции легче 1800 кг/м^3. Распределение зольности по фракциям плотности имеют максимальное различие в пробе №3 (порядка 10%). Фракция плотности более 2400 кг/м^3 имеет зольность в пробах №1 и №2, 96,7 и 98,3 %, соответственно при выходе 37,7 и 27,5 %, в пробе №3 во фракцию более 2400 кг/м^3 выделяется 30 % материала с зольностью 91 %.

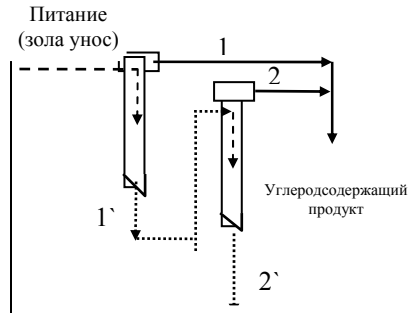
По методике релиз-анализа была определена предельно возможная флотируемость и распределение материала по фракциям флотируемости для исследуемых проб золы уноса. Результаты представлены на рис. 1.

Технологические схемы и режимы флотации золы уноса

Одним из возможных методов разделения золы на горючую и минеральную составляющие является флотационный метод.

Результаты разделения золы унос на пилотной установке колонной флотации

2-х стадиальная схема флотации



Отходы
(материал для стройиндустрии)

N оп	Углеродсодержащий продукт		Отходы			$\varepsilon^{к}_{г.м.}$	$\varepsilon^{отх.}_{з}$	Eo,
	$Y^{п}$, %	$A^{п}$, %	$Y^{о}$, %	$A^{о}$, %	LOI, %	%	%	%
	Проба №1 PSEG Ponded Ash (от 07.07.2006 г)LOI=6-7% A исх.= 94,1 %							
1	17,78	79,18	82,2	97,7	2,3	66,1	85,1	56,2
2	20,75	78,9	79,25	98,0	2,0	73,0	82,3	60,0
3	21,9	78,6	78,1	97,4	2,6	69,9	80,6	56,4
4*)	21,3	74,6	78,7	98,2	1,8	96,6	81,9	79,1

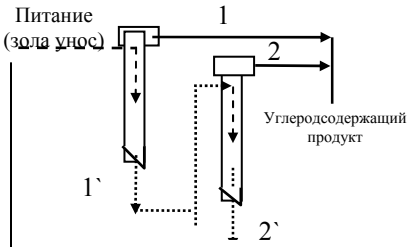
*)Оптимальный результат. Подготовка пульпы при интенсивном перемешивании с собирателем (n=1800 об/мин), время- 3 мин; плотность пульпы 150г/л;

Скорость потока пульпы 1,4 см/с; расход воздуха – 0,5 л/мин;

Реагентный режим:

Основная флотация – дизельное топливо - 1600 г/т; Монтанол 802-360 г/т;

Контрольная флотация – дизельное топливо – 1600г/т; Монтанол 802-250 г/т;



Отходы
(материал для стройиндустрии)

	Проба №2 PSEG Drey Ash (от 07.07.2006г) LOI=6-7% A исх.= 92,1%							
1*)	26,0	74,5	74,0	98,6	1,4	87,2	79,1	69,0
2	24,7	74,3	75,3	98,1	1,9	81,5	80,1	65,3
3	23,9	70,9	76,1	97,9	2,1	80,9	81,5	65,9

*)Оптимальный результат. Подготовка пульпы при интенсивном перемешивании с собирателем (n=1800 об/мин), время- 3 мин; плотность пульпы 150г/л;

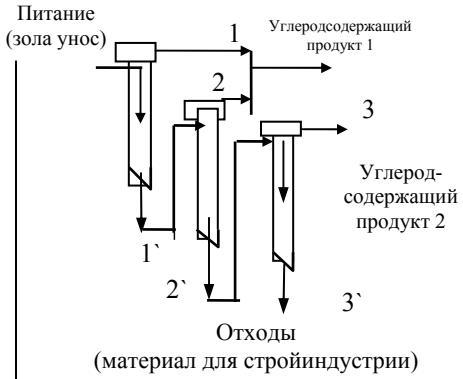
Скорость потока пульпы 1,4 см/с; расход воздуха – 0,5 л/мин;

Реагентный режим:

Основная флотация – дизельное топливо - 1600 г/т; Монтанол 802-360г/т;

Контрольная флотация – дизельное топливо – 1600г/т; Монтанол 802-250 г/т;

3-х стадиальная схема флотации



	Проба №3 DYNEG Dry Ash (от 07.07.2006г) LOI >20% Аисх.=75,9							
1*)	28,0[1)]	77,5				25,7		
	35,2[2)]	53,0	36,8	95,6	4,4	67,6	46,6	43,5
2	46,7[1)]	78,5				44,6		
	23,3[2)]	54,0	30,0	94,3	5,7	47,7	36,5	33,7

*)Оптимальный результат. Подготовка пульпы при интенсивном перемешивании с собирателем (n=1800 об/мин), время- 3 мин; плотность пульпы 150г/л;

Скорость потока пульпы 1,4 см/с; расход воздуха – 0,5 л/мин;

Реагентный режим:

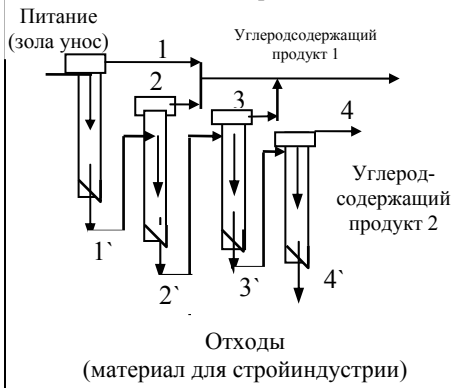
Основная флотация – дизельное топливо - 3200 г/т; Монтанол 802-360 г/т;

1-я контрольная флотация – дизельное топливо – 3200 г/т; Монтанол 802-360 г/т;

2-я контрольная флотация – дизельное топливо – 1600 г/т; Монтанол 802 –360г/т

1) – углеродсодержащий продукт 1+2; 2) – углеродсодержащий продукт 3;

4-х стадиальная схема флотации



	Проба №3 DYNEG Dry Ash (от 07.07.2006г) LOI >20% Аисх.=75,9							
1	38,5[1)]	77,3				33,9		
	33,3[2)]	50,6	28,2	97,9	2,1	63,8	37,2	46,5

Подготовка пульпы при интенсивном перемешивании с собирателем (n=1800 об/мин), время- 3 мин; плотность пульпы 150г/л;

Скорость потока пульпы 1,4 см/с; расход воздуха – 0,5 л/мин;

Реагентный режим:

Основная флотация – дизельное топливо - 3200 г/т; Монтанол 802-360 г/т;

1-я контрольная флотация – дизельное топливо – 3200 г/т; Монтанол 802-360 г/т;

2-я контрольная флотация – дизельное топливо – 1600 г/т; Монтанол 802 –360г/т

1) – углеродсодержащий продукт 1+2+3; 2) – углеродсодержащий продукт 4;

391

Известен ряд работ по извлечению углерода из летучей золы методом флотации.

Анализ современного состояния утилизации золы-уноса позволяет считать целесообразным использование флотационной технологии для выделения из золы-уноса двух продуктов: минерального продукта с содержанием угольных частиц не более 3 %, являющегося исходным сырьем для производства строительных материалов, и продукта с содержанием органической составляющей более 50 %, который может быть использован, как добавка к топливу ТЭС для повторного сжигания.

Применение флотационного метода разделения, как показали исследования предельной флотируемости, позволяет получить высокозольные отходы - зольность 97-98 %. Выполненные исследования показывают возможность дообогащения золы с получением чистой минеральной части (с зольностью > 98 %) при выходе до 76-80 % из проб золы №1 и №2. При этом выделяется и 24-20 % продукта с зольностью порядка 74 %. Из пробы №3 можно выделить до 45,3 % чистой минеральной части с зольностью 96 %, 39,5 % угольного продукта с зольностью 46 % и 15,2 % продукта с зольностью 85,1 %.

На данном этапе работы была поставлена задача разработки технологических режимов флотационного разделения, позволяющих получать минеральную часть с содержанием углерода (LOI) до 2 % и органическую часть с содержанием золы менее 50 %.

Стенд для проведения технологических исследований

Исходя из современных тенденций в области флотационного оборудования, исследования проводились по флотационному разделению золы уноса в пневматическом многосекционном колонном аппарате. Применение таких аппаратов связано с рядом преимуществ их использования, таких как снижение энергоемкости в 3-4 раза по сравнению с машинами механического типа: значительное сокращение металлоемкости, производственных площадей, сокращение эксплуатационных затрат.

Учитывая трудности эффективного разделения золы уноса с дос-тижением требуемых показателей качества конечных продуктов: содержание несгоревшей органики в минеральной части должно составлять до 2 %, зольность органической составляющей не должна превышать 50 % - задача исследований включала изучение влияния различных технологических и конструктивных параметров флотационного разделения. Количество конструктивных факторов, позволяющих изменять аэрогидродинамические параметры, влияющие на результаты разделения в механической машине, ограничены - это окружная скорость импеллера (т.е. число оборотов), определяющая количество и дисперсность засасываемого в камеру воздуха. Многосекционный колонный аппарат является более благодатным инструментом для исследования, т.к. позволяет варьировать количество и дисперсность воздушных пузырьков в довольно широких и достаточно легко управляемых пределах, а также имеется ряд дополнительных параметров: как, например, направление движения и структура потоков пульпы и воздуха, высота слоя пены и др.

Исследования на стенде колонной флотации проводились в проточном режиме. На рис. 2 представлен общий вид лабораторного стенда колонной флотации.

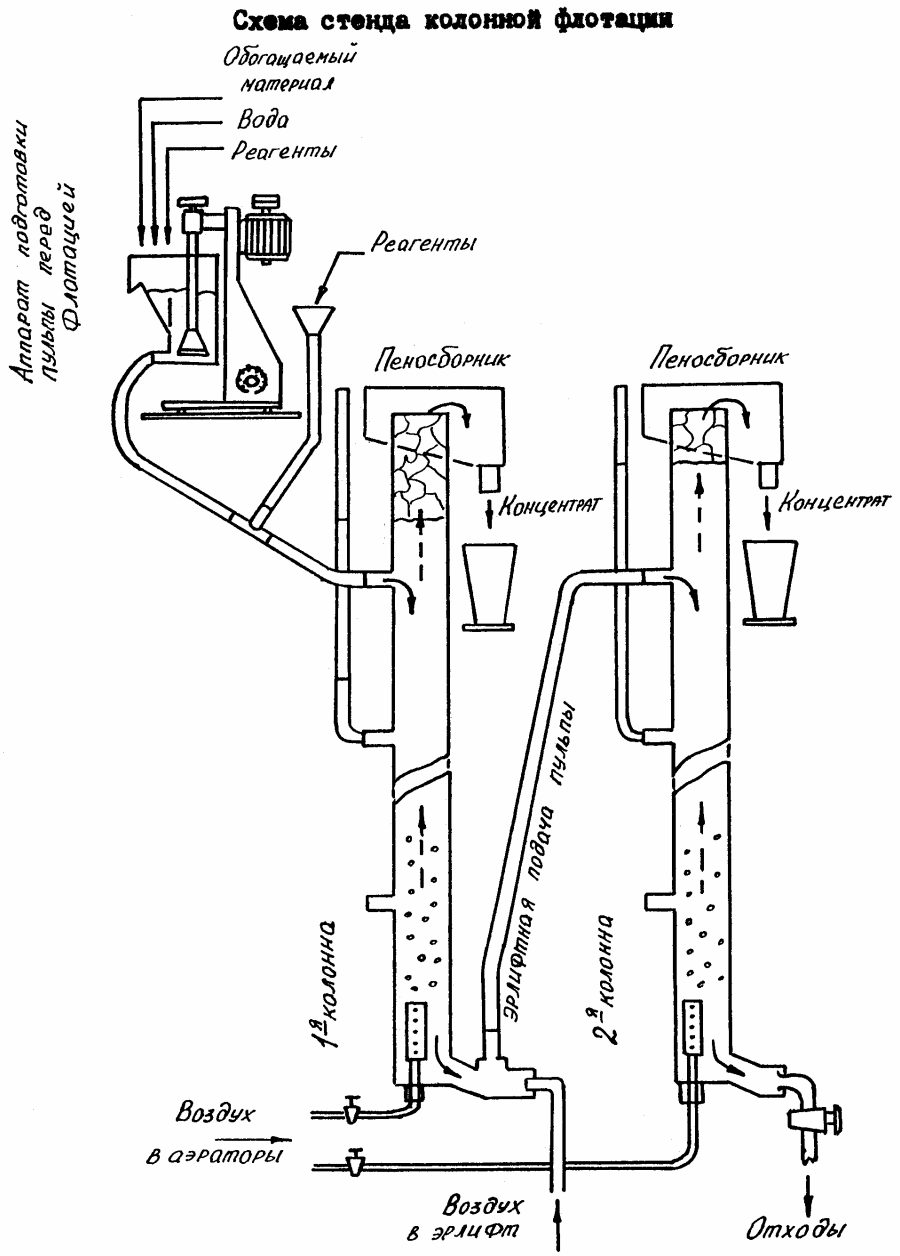
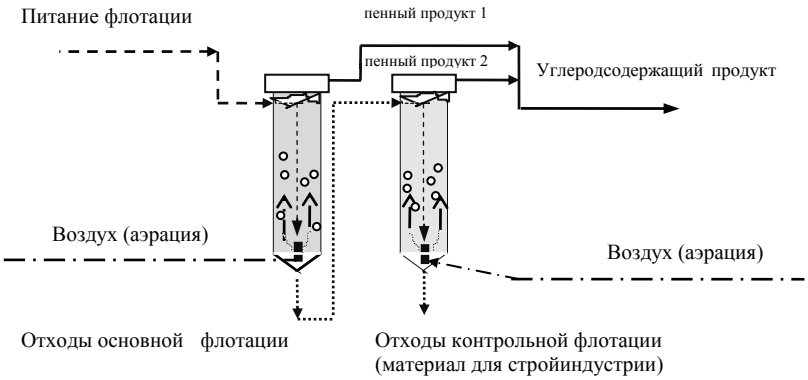
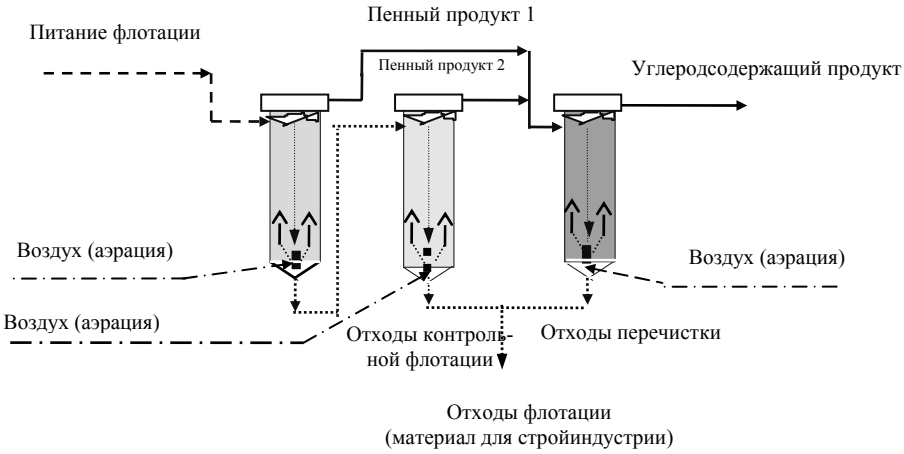


Рис. 2. Лабораторный стенд колонной флотации



а)



б)

Рис. 3, а, б. Схемы флотации в колонном аппарате: а) двухстадиальная флотация в 2-х камерной колонне; б) флотация с перечисткой концентрата в 3-х камерной колонне

Схемы флотации приведены на рис. 3, *а, б*. Первая схема (рис. 3, *а*) использует две камеры, в первой из которых проводится основная флотация, а во второй – контрольная. По второй схеме используется дополнительная третья камера флотомашины для перечистки углеродсодержащего концентрата (рис. 3, *б*). Отходы перечистки могут объединяться с отходами основными или могут быть выделены в отдельный продукт, имеющий другое товарное качество. Также возможен вариант с двумя контрольными операциями флотации.

Результаты флотационного разделения золы уноса на пилотном стенде колонной флотации

Решая вопрос оптимизации разделения с учетом изучения возможностей получения продуктов с минимальным содержанием углерода в минеральной, и максимальным извлечением горючей массы в органической части, было исследовано влияние:

- времени перемешивания при кондиционировании пульпы с реагентами

перед флотацией;

- расхода и дисперсности воздуха при флотации в колонном аппарате;

- скорости потока пульпы в колонном аппарате.

В качестве параметров оптимизации процесса разделения рассматривались:

- зольность органической части (пенного продукта) (A_k^d, %);

- содержание несгоревшего углерода (LOI, %) в отходах флотации (минеральной составляющей);

относительная эффективность разделения определяемая как произведение извлечения зольной составляющей в отходы и органической составляющей в концентрат

($E_o = \varepsilon_{г.м.}^{к} \varepsilon_з^{отх.} / 100, \%$).

На основании литературных данных и ряда экспериментов было определено, что для эффективного выделения угольных частиц из тонкодисперсной золы уноса флотация должна проводиться при высокой плотности суспензии – 150-200 г/л.

Одним из существенных факторов, влияющих на эффективность разделения зольной и угольной составляющих золы уноса, оказался фактор ин-тенсивности перемешивания пульпы при контакте с реагентами. Во флотационной машине механического типа зола уноса подвергается разделению на минеральную и угольную составляющую при скорости вращения импеллера 1800-2500 об/мин. В случае флотации высокоминерализованной золы уноса, содержащей количество угольных частиц порядка 6-7 %, и содержании тонких частиц крупностью менее 50 мкм до 80 %, при малой интенсивности перемешивания (до 1000 об/мин) при контакте с реагентами в аппарате подготовки пульпы, при попадании ее в колонный аппарат разделения угольной и минеральной части практически не происходит даже при изменении в достаточно широких пределах всех остальных параметров (расход реагентов, расход воздуха, изменение структуры потоков пульпы и воздуха). Поскольку в колонном аппарате, в отличие от механической флотомашины, отсутствует интенсивное перемешивание пульпы, то влияние интенсивности перемешивания определялось при подготовке пульпы перед флотацией. При увеличении числа оборотов мешалки до 1500 об/мин при подготовке пульпы при контакте с собирателем (при прочих равных параметрах) наблюдается эффект четкого разделения золы уноса на минеральную и углеродсодержащую фракции. Увеличение числа оборотов до 2000 об/мин позволяет повысить эффективность разделения.

При выбранной оптимальной интенсивности перемешивания (1700 об/мин) с собирателем в контактном чане исследовалось влияние времени перемешивания. Время перемешивания с реагентами в контактном чане изменялось от 3 до 7 мин. Увеличение времени перемешивания позволяет значительно интенсифицировать процесс разделения в колонном аппарате. Наилучшие результаты были получены при времени перемешивания 5 минут. Однако, учитывая факторы масштабного перехода к промышленным аппаратам, увеличение времени перемешивания в контактном чане до 5 минут приводит к существенному увеличению энергозатрат, поэтому была сделана попытка достигнуть оптимальных результатов разделения за счет изменения гидродинамических характеристик колонной флотации при времени перемешивания оптимальном для взаимодействия твердой фазы пульпы с реагентами - 3 мин.

Одним из наиболее существенных параметров является расход воздуха, вернее соотношение расходов воздуха и пульпы ($Q_п$ /$Q_в$), определяющее газосодержание при флотационном разделении. Расход воздуха варьировался от 0,5 до 1,2 л/мин (при этом $Q_п$ / $Q_в$ изменялось от 0,9 до 0,4).

При расходе воздуха 0,8 л/мин ($Q_п/Q_в$=0,6) эффективность разделения при заданных характеристиках процесса оказалась оптимальной, уве-личение расхода воздуха до 1,2 л/мин приводит к снижению селективности разделения в основной и контрольной флотации.

Следующим исследуемым параметром оптимизации селективности разделения являлась дисперсность воздушных пузырьков, варьирование которой осуществлялось при заданном расходе воздуха увеличением длины аэратора: в качестве которого использовалась резиновая трубка с нанесенными отверстиями. Расход воздуха был выбран 0,5 л/мин, длина аэратора изменялась от 15 до 30 см. При длине аэратора 20 см была достигнута оптимальная эффективность разделения. Увеличение расхода воздуха до 0,8 л/мин при данной длине аэратора привело к снижению селективности разделения.

Наиболее интересные результаты и режимы флотации представлены в таблице. Полученные результаты флотации для исследуемых проб показывают, что получить два кондиционных продукта и тем самым решить задачу безотходной технологии переработки представленных проб не представляется возможным. Однако, для проб золы-уноса №1 и №2 получение минеральной части с содержанием LOI до 2 % при существенном выходе и эффективности разделения 69 и 79 % может оказаться вполне рентабельным.

Выводы

1. Показана возможность флотационного разделения золы-уноса в колонном многосекционном аппарате с получением кондиционной минеральной составляющей с содержанием LOI до 2 % с относительной эффективностью разделения Ео=79 % для пробы №1, 69 % - для пробы №2 и 46 % - для пробы №3.

2. Предложена технологическая схема, включающая флотационное разделение золы уноса, с основной и контрольной флотацией в 2-х камерном колонном аппарате, определены оптимальные режимы селекции для переработки золы-уноса текущей работы ТЭС (проба №1), и - из золоотвалов (роба №2). ГИАБ

Коротко об авторах

Рубинштейн Ю.Б., Самойлова Е.К. – ФГУП ИОТТ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *А.А. Абрамов.*