

**В.И. Новак, В.А. Козлов, М.Ф. Пикалов**

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ  
СПИРАЛЬНЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ  
УЛЬТРАТОНКОГО УГЛЯ**

*Рассмотрены результаты стендовых и промышленных исследований работы спиральных сепараторов на ультратонком угле крупностью 0,044—0,15 мм. Установлено, что для обеспечения максимальной эффективности сепарации необходима концентрация твердого в пульпе 12 % (по весу) при нагрузке по пульпе около 3,6 м<sup>3</sup>/ч на один заход спирального сепаратора.*

*Ключевые слова: спиральный сепаратор, угольный шлам, класс крупности, концентрация твердого в пульпе, зольность, погрешность разделения, плотность разделения.*

---

**А**нализ технологических схем и оборудования, применяемых для обогащения угля в последнее десятилетие, показывает, что за рубежом и на новых фабриках в России с использованием спиральных сепараторов обогащается 6—7 % от всего угля, перерабатываемого на обогатительных фабриках. Но применение спиральных сепараторов, как правило, связано с обогащением угля с размером частиц класса 0,15—1(2) мм. Широкое распространение спиральных концентраторов обусловлено простотой их конструкции, низкой стоимостью и способностью обеспечивать минимальные потери угольных частиц низкой плотности с отходами.

Исходя из типового применения в обогащении угля, спирали эффективно работают при нагрузках в диапазоне от 2 до 3 т/ч на заход, при рекомендуемом содержании твердого 30 % по весу [1, 2]. Показатели сепарации спиралей зависят, как от характеристик питания, так и определяются эксплуатационными режимами работы спирали. К характеристикам питания относятся гранулометрический и фракционный состав шлама, а к режиму работы — нагрузка по пульпе, содержание твердого в пульпе и положение делителей потока. Погрешность разделения при оптимальной нагрузке составляет 0,13—0,15 при плотности разделения 1,7—1,8 т/м<sup>3</sup>. При увеличении нагрузки на заход с 3 до 5 т/ч плотность разделения возрастает с 1,8 до

2,1 т/м<sup>3</sup>. В этом случае погрешность разделения увеличивается с 0,16 до 0,30 т/м<sup>3</sup>.

На протяжении последних двух десятилетий значительные усилия исследователей были сосредоточены на разработке сепараторов, разделяющих уголь крупностью менее 0,15 мм по плотности. Оказалось, что такие сепараторы потенциально могут быть даже более селективными по сравнению с такой традиционной технологией, как пенная флотация, и быть более понятными в работе для рядового оператора обогатительной установки. На основании исследований, проведенных Ричардсом и др. [3] в 2000 г., сообщается, что спирали могут эффективно разделять по плотности угольный шлам крупностью менее 0,1 мм.

Оптимизация рабочих характеристик спирального сепаратора была достигнута применительно к обогащению ультратонкого угля с использованием эмпирических моделей, построенных на основании данных, полученных при выполнении программы эксперимента. Оптимизированные условия испытаний далее использовались в качестве руководства при разработке программы следующих испытаний, в ходе которых производилась количественная оценка эффективности сепарации угля, классифицированного как труднообогащаемый.

Исходный мелкий уголь был отобран из потока подрешетного продукта дешламационного грохота обогатительной фабрики, перерабатывающей уголь пласта «Коулберг» в Центральных Аппалачах (США). Отобранная пульпа отмывалась на дуговом сите с ячейкой 210 микрон, подрешетный продукт которого использовался в исследованиях как питание спирали. Ситовый анализ пульпы показал, что примерно 58,9 % твердого имеет крупность 25—210 микрон (табл. 1), а зольность составила 49,9 %. Фракционный анализ был выполнен для классов крупности 0,15—1 мм и 0,075—0,15 мм с использованием раствора метавольфрамата лития (LMT).

Эти эксперименты проводились на австралийских однозаточных 4-хвитковых спиралях LD4 диаметром 1000 мм. Спираль работала по замкнутому циклу — когда концентрат, промпродукт и отходы снова направлялись в бак исходного питания. Клапан, установленный в питающем трубопроводе,

Таблица 1

**Гранулометрический состав твердого в пульпе исходного питания**

<b>Крупность, мм</b>	<b>Выход, %</b>	<b>Зольность Ad, %</b>
0,15—0,21	23,51	26,57
0,075—0,15	23,82	33,87
0,044—0,075	11,56	53,18
0—0,044	41,11	71,54
<b>Всего:</b>	<b>100,0</b>	<b>49,87</b>

управлял количеством пульпы, возвращаемой в питающий бак, что в свою очередь позволило устанавливать требуемую нагрузку на спираль. Положение делителя измерялось от наружной стороны центральной колонны до его острия.

Целью экспериментов являлся сбор всех необходимых данных для построения эмпирических моделей, которые впоследствии были использованы для определения оптимальных условий для обогащения класса 44—210 микрон.

После построения модели, путем поиска значения максимального извлечения горючей массы в концентрат были найдены оптимальные условия работы спирали. Для проверки полученных результатов была проведена серия последующих испытаний на спиральных. Пробы, отобранные при работе спирали в оптимизированном режиме, были подвергнуты фракционному анализу с целью построения кривых обогатимости и количественной оценки достигнутой эффективности.

В экспериментах спиральный сепаратор обеспечил снижение зольности с 33,5 до 11,7 %, при извлечении горючей массы в концентрат 84 %. Однако, показатели разделения оказались существенно хуже идеальной теоретической кривой разделения и данных отчета о пенной флотации. Тем не менее, в сравнении с пенной флотацией, простота спиралей, их низкие капитальные и эксплуатационные затраты часто бывают более привлекательны, даже несмотря на их более низкие показатели эффективности работы.

Оптимизированные режимы сепарации и соответствующие им значения параметров, определяемые посредством методики оптимизации с использованием эмпирических моделей, представлены в табл. 2. Интересный вывод заключается в том, что

Таблица 2

**Рабочие условия, рассчитанные по нелинейной оптимальной модели, и обеспечивающие максимальное извлечение при заданной зольности концентрата (крупность твердого 44—210 микрон)**

Нагрузка по исх. пульпе	Содержание твердого,	Положение делителя,	Заданная зольность концентрата,	Максимальное извлечение	Производительность по твердому,
46	13,2	30	12	83,50	0,38
46	14,5	27	13	87,70	0,42
46	15,8	23	14	91,30	0,46
46	17,1	19	15	94,17	0,50
49	16,1	16	16	95,75	0,51
58	14,9	16	17	96,40	0,55
67	13,7	16	18	96,89	0,58
75	12,6	16	19	97,23	0,59
83	11,6	16	20	97,46	0,60
90	10,7	16	21	97,58	0,61

содержание твёрдого в питании и положение делителя играли наиболее значительную роль в достижении оптимальных характеристик. Причём, чтобы уменьшить зольность концентрата, необходимо уменьшать содержание твёрдого в питании.

На основании оптимальных данных, полученных по эмпирическим моделям, было проведено пять дополнительных экспериментов [4]. Как показано в табл. 3, достигнутые в этих испытаниях эффективные значения параметров сравнимы с их прогнозируемыми значениями в табл. 2. Значение положения делителя в определении плотности разделения со всей очевидностью демонстрируют результаты тестов 3 и 4, где возрастание плотности разделения было получено при размещении делителя ближе к центру. Следует также отметить, что в обоих тестах унос в отходы материала с низкой плотностью был ничтожен. В соответствии с данными Ричардса, смещение положения делителя к центральной области ведет к возрастанию плотности разделения. Значения эффективности разделения ( $E_p$ ), достигнутые при оптимальных условиях обогащения фракции 44—210 микрон являются вполне приемлемыми и не так уж отличаются от значений, достигнутых при обогащении угля крупно-

Таблица 3

**Показатели и эффективность сепарации, достигнутые при обогащении угля крупностью 44—210 микрон при оптимальных режимах работы спирали**

Эффективные параметры	Тест 1	Тест 2	Тест 3	Тест 4	Тест 5
Зольность исходного питания, %	36,82	35,26	36,04	38,45	31,85
Зольность концентрата, %	11,71	13,30	16,14	19,73	8,04
Зольность отходов, %	74,92	85,61	90,51	91,10	69,10
Выход концентрата, %	60,28	69,63	73,24	83,02	50,19
Извлечение горючей массы в концентрат, %	84,23	93,25	96,03	97,78	74,99
Извлечение породных фракций в отходы, %	80,83	73,73	67,21	48,58	89,50
Эффективность сепарации, %	65,06	66,98	63,24	46,36	64,49
Плотность разделения, d50	1,89	2,06	2,17	2,25	1,65
Вероятная ошибка плотности разделения, Ер	0,23	0,22	0,13	0,13	0,22
Потери материала высокой плотности /%	15,05	19,95	27,55	42,36	5,03
Потери материала низкой плотности /%	9,77	2,00	0	0	16,93
Эффективность по горючей массе /%	86,88	96,13	98,49	99,78	78,11

стью 1—0,15 мм [2]. Данные табл. 3 явно указывают, что возможно достичь зольности концентрата в пределах 8—12 %, установив нагрузку по исходной пульпе между 30 и 46 л/мин., содержание твердого 12 % (весовых) и положение делителя в 30 см от центральной колонны. Это соответствует нагрузке по твердому на заход спирали от 0,25 до 0,40 т/ч.

Для оценки параметров сепарации спирали SX7 в случае её применения для обогащения песков вторичного классифика-

ционного циклона диаметром 150 мм, были проведены промышленные испытания на обогатительной фабрике, обогащающей уголь пласта №6 месторождения в Иллинойсе (США). Номинальное питание спирали с размером частиц 44–150 микрон содержало около 12,0 % твёрдого. Объёмные и массовые нагрузки по питанию составили 70 л/мин и 0,6 т/ч, соответственно. Как показано в табл. 4, были достигнуты значительные снижения зольности и общего содержания серы для фракций всех размеров частиц в питании. Для угля с размером частиц +44 микрона 60 % породных фракций было удалено в отходы, в то время как для всего угля в целом извлечение породных фракций в отходы составило 48,3 %. Извлечение общей серы в отходы достигло 47,6 %. Чтобы добиться приемлемого конечного продукта, необходимо в классификационном циклоне или дуговом сите удалить класс –0,044 мм.

Лабораторными и промышленными исследованиями было установлено, что спирали могут эффективно применяться для обогащения углей крупностью до 44 микрон. Были достигнуты плотности разделения около 1,8 при вероятных ошибках в промежутке 0,2 и 0,25. Тем не менее, оптимизация значений параметров процесса использованием эмпирических моделей, разработанных на основе экспериментальных данных, указывает на то, что нагрузку по твёрдому необходимо существенно снизить по сравнению с обычными нагрузками, используемыми при обогащении угля с размером частиц 0,15–1 мм. Оптимальная нагрузка по пульпе составляла ниже 60 л/мин, в то

Таблица 4

**Промышленные показатели, достигнутые на спиралях SX7 при обогащении угля номинальной крупностью –150 микрон (данные по промпродукту не показаны)**

Класс, мм	Питание		Концентрат		Отходы	
	Зола, %	Сера, %	Зола, %	Сера, %	Зола, %	Сера, %
0,15–1	8,44	2,64	4,67	2,45	36,87	4,38
0,044–0,15	19,33	3,37	11,80	2,64	56,33	5,86
0–0,044	53,74	5,77	45,66	4,44	68,68	9,91
Выход к исходному, %	100,00		65,08		13,03	

время как оптимальное содержание твёрдого составляло около 12 % (по весу), что соответствует нагрузке по твёрдому 0,6 т/ч. Все три регулируемых параметра: объёмная нагрузка по исходному питанию, содержание твёрдого в питании и положение делителя, важны, когда речь идёт о достижении максимального выхода концентрата при его зольности, находящейся в заданных рамках.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kempnich R.J.* Coal preparation — a world review. Proceedings 20th International Coal Preparation Conference. Lexington, Kentucky, Primedia Business Magazine Media, 2003. — P. 15—40.

2. *Osborne D.G.* Fine coal cleaning by gravity methods: a review of current practice. *Coal Preparation*, vol. 2. — 1986. — P. 207—242.

3. *Richards R.G., MacHunter D.M., Gates P.J., Palmer M.K.* Gravity separation of ultra-fine (–0.1 mm) minerals using spiral separators. *Minerals Engineering*, vol. 13. — no. 1. — 2000. — P. 65—77.

4. *Richards R.G., Hunter J.L., Holland-Batt.* Spiral concentrators for fine coal treatment. *Coal Preparation*, vol. 1. — 1985. — P. 207—229. **ГИАБ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

---

*Новак Вадим Игоревич* — кандидат технических наук, директор, novak@cetco.ru,  
*Козлов Вадим Анатольевич* — кандидат технических наук, доцент, главный технолог, vak@cetco.ru,  
*Пикалов Михаил Федорович* — инженер-технолог, pikalov@cetco.ru,  
Угольный департамент Коралайна Инжиниринг — CETCO.

