

**В.А. Козлов, В.И. Новак**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА КАЧАЮЩЕЙСЯ ПОСТЕЛИ  
В ОБОГАЩЕНИИ УГОЛЬНОГО ШЛАМА**

*Проведен анализ развития метода обогащения угольного шлама в сепараторах с качающейся постелью. Рассмотрены конструктивные особенности наиболее известных сепараторов, в которых реализован указанный метод обогащения. Отмечены их достоинства и недостатки. Показаны технологические схемы установки сепараторов на обогатительных фабриках.*

*Ключевые слова: обогащение угля, сепаратор с качающейся постелью, угольный шлам, датчик слоя, разрыхляющая вода, плотность разделения, класс крупности, технологическая схема.*

---

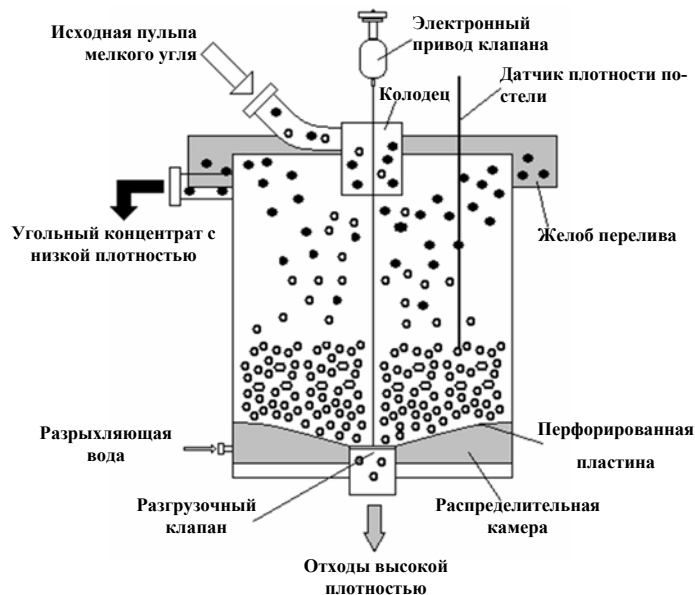
**П**рименение сепараторов с качающейся постелью (СКП) в цепях обогащения зернистого угольного шлама класса менее 2 мм значительно возросло за прошедшее десятилетие. К достоинствам СКП относятся способность достижения эффективного разделения по плотности при относительно высокой нагрузке, возможность регулировки в процессе работы в ответ на изменения характеристик питания и колебаний нагрузки, а также простота эксплуатации. Обычно СКП устанавливают для замены или для применения совместно со спиральными сепараторами, которые имеют относительно низкую удельную производительность, что делает их сильно зависящими от точного распределения исходного питания. По производительности единичный СКП может заменить блок с десятью трехзаходными спиралями. Применение СКП наиболее оправдано, когда необходимо исключить влияние разброса параметров питания на результаты процесса сепарации.

В мире производятся несколько различных типов СКП. Наиболее известные из них: Стокс, Рефлюкс и Кроссфлоу. В конструкции Кроссфлоу учтены и устранены недостатки, наблюдаемые в работе сепараторов Стокс. Данные по СКП, доступные в литературе, кратко обобщены в данной публикации.

Гидравлические классификаторы с восходящим потоком воды известны более века и использовались в угольной и рудной

промышленности в основном для разделения частиц по крупности. Сепараторы с конусным бункером, работавшие на том же принципе, широко использовались в первой половине прошлого века для обогащения крупного угля. Разделение достигалось с помощью восходящего потока воды, создающего взвешенную песчаную постель. Плотность песчаной постели регулировалась, чтобы обеспечить разделение легких частиц угля и тяжелой породы. В настоящее время в СКП, для создания взвешенной постели, используются тяжелые частицы породы, поступающей с исходным углем, а не добавки песка извне. Таким образом, СКП обеспечивают сепарацию по плотности с использованием естественной разделяющей среды.

Самым известным из СКП, выпускаемым с 1970 годов, и поэтому наиболее распространенным, является сепаратор Стокс. На рис. 1 показана схема этого сепаратора, объясняющая принцип его работы. Мелкий уголь в виде пульпы подается в центральный колодец, расположенный сверху. Попав внутрь, частицы начинают осаждаться в направлении, противоположном



**Рис. 1. Схема работы сепаратора Стокс**

восходящему потоку воды. Разрыхляющая вода подается через распределительную пластину, расположенную внизу. Скорость восходящего потока воды устанавливается равной скорости осаждения частиц самых тонких классов плотностью больше  $1,9 \text{ г/см}^3$ . Как результат, частицы этого класса оказываются во взвешенном состоянии и начинают формировать постель.

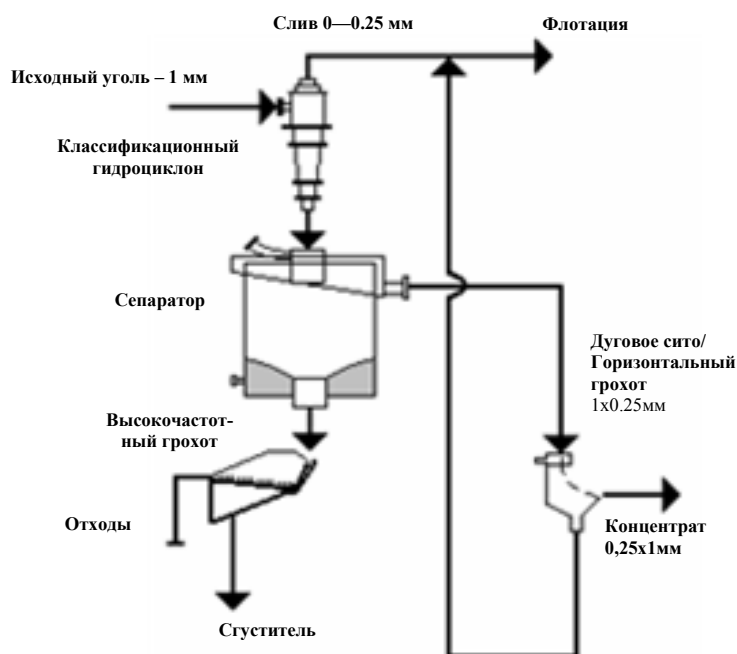
Верхний граничный слой постели поднимается вверх до тех пор, пока не достигнет контрольного уровня, который, обычно, чуть ниже края впускной трубы. Ленточный датчик давления простирается по всей высоте сепаратора и измеряет давление создаваемое постелью, в зависимости от ее высоты и плотности формирующих ее частиц. Когда уровень постели достигает контрольной высоты, срабатывает управляющий контроллер, открывающий разгрузочный клапан, и частицы с высокой плотностью выпускаются в сливную трубу отходов. Система управления позволяет непрерывно регулировать объем выпускаемых отходов, в зависимости от количества частиц высокой плотности в потоке отходов. Частицы высококачественного угля, обладающие низкой плотностью, не способные проникнуть в постель из частиц с более высокой плотностью, выносятся потоком разрыхляющей воды наверх и разгружаются в концентратный желоб.

В США и Австралии сепараторы с качающейся постелью применяются в основном, как альтернатива спиральям. Как показано на рис. 2 уголь класса менее 1 мм поступает в классификационный гидроциклон, где происходит его дешламация по 0,15—0,25 мм и сгущение твердого.

С точки зрения гидравлической нагрузки рекомендуется, чтобы содержание твердого в питании СКП было выше 30 % по весу. Пески циклона являются питанием СКП. Перелив СКП содержит чистый уголь вместе с той долей шламов, которая присутствовала в песках гидроциклона. При этом содержание твердого в переливе сепаратора низкое из-за разбавления потоком восходящей воды. По этой причине, прежде чем попасть на конечное обезвоживание в центрифуге, пульпа концентрата поступает на обезвоживание и дешламацию на дуговом сите или на горизонтальном грохоте. В некоторых случаях, до направления на грохот, перелив СКП мо-

жет сгущаться и дешламироваться в батарее классификационных гидроциклонов. Нижний продукт СКП (пески), состоящий из частиц породы с высокой плотностью, имеет высокое содержание твердого, порядка 50 % и выше. Пески обычно обезвоживаются на высокочастотном грохоте.

Некоторые фабрики за рубежом, считают своим достижением, что они обогащают в СКП материал крупностью до 2 мм с почти вдвое большей производительностью, чем производительность на угле с максимальным зерном менее 1 мм. Типичной причиной повышения верхней границы зерна является желание снизить нагрузку на отделение тяжелосредних гидроциклонов и снизить расход магнетита. Наименьший размер частицы остающейся в сепараторе составляет около 0,25 мм. Частицы в питании размером от 0,25 мм до 2 мм соотносятся по крупности, как 8:1, что превышает допустимые значения для сепаратора Стокс. Результатами такого, далекого от оптимального



**Рис. 2. Схема обогащения угля с использованием СКП**

соотношения, являются плохие показатели сепарации. Оптимальными считаются условия, при которых частицы самой тяжелой фракции соотносятся по крупности как 4:1. Частицы размером больше оптимального попадают в отходы, а частицы меньше — в концентрат, вне зависимости от их плотности.

С учетом сказанного, если верхний размер частиц в питании составляет 2 мм, то нижняя граница должна составлять около 0,5 мм. Если нижняя граница зерна составляет 0,25 мм, то рекомендованная верхняя граница должна быть 1 мм.

СКП демонстрируют эффективную работу при максимальной крупности частиц до 2 мм и минимальной крупностью до 0,075 мм. Диапазон крупности ограничен фундаментальными основами процесса.

Например в работе [1] приводится технологическая схема обогатительной фабрики Stratford (Австралия), где СКП был

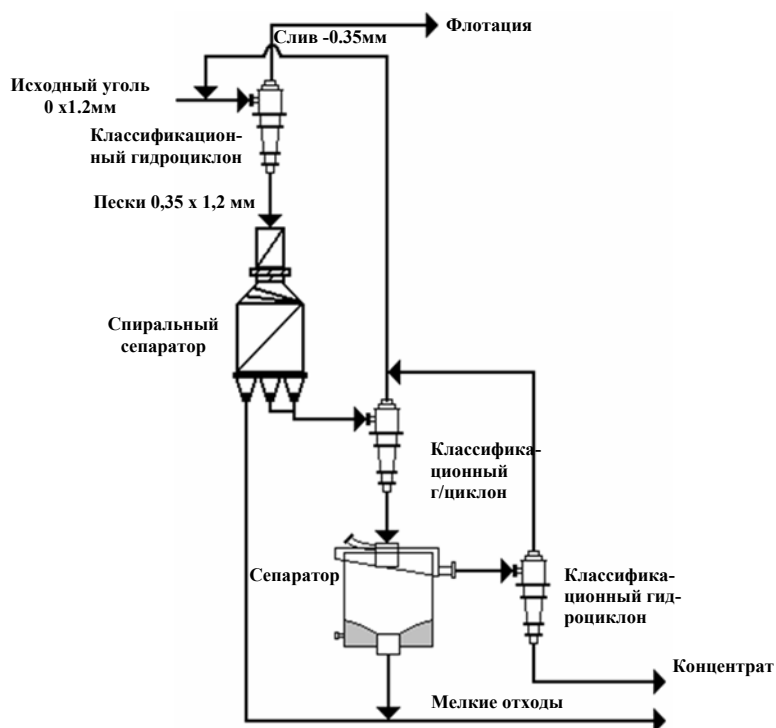


Рис. 3. Схема обогащения мелкого угля на ОФ Stratford

установлен для пересортировки концентрата 0,35 x 1,2 мм спирального сепаратора, как показано на рис. 3. Задачей стояло снизить граничную плотность в цепи мелкого угля, подняв ее в контуре обогащения крупного угля и тем самым максимизировать общий выход концентрата. Для этих целей на фабрике был установлен сепаратор Стокс диаметром 2,1 м и производительностью 75 т/ч.

Сепаратор позволил снизить зольность концентрата спиральных сепараторов с 17,7 % до 10,0 % путем достижения более низкой плотности разделения ( $\rho_{50}$ ) находившейся в диапазоне от 1,44 до 1,64 г/см<sup>3</sup>. Значения вероятного отклонения ( $E_{pm}$ ) составили от 0,11 до 0,15, что сопоставимо с достигаемыми значениями на спиральных сепараторах.

Данные собранные в процессе тестовых испытаний в разных режимах позволили создать модели, описывающие плотность разделения и вероятную погрешность, как функцию от содержания твердого в питании, расхода разрыхляющей восходящей воды и давления постели. Повышение твердого в питании увеличивает как  $\rho_{50}$ , так и  $E_{pm}$ . Другой сепаратор Стокс диаметром 3,0 м был установлен на ОФ Bayswater (Австралия) [2], где он используется совместно со спиральными сепараторами для обогащения угля класса 0,125 x 2 мм. До установки СКП, верхняя граница крупности в этой цепи была 0,8 мм, а уголь класса 0,15x0,8 мм обогащался в блоке спиралей. Как показано на рис.4, в модифицированной схеме, уголь крупностью –2 мм предварительно направляется в СКП для максимизации извлечения угля и удаления тяжелой и крупной породы. Обезвоживание и дешламация концентрата СКП производятся на дуговом сите и горизонтальном грохоте. Подрешетный продукт грохота направляется на пересортировку в блок спиральных сепараторов, концентрат спиралей дешламируется в классификационном гидроциклоне и присаживается к концентрату СКП. В результате установки СКП и такого изменения технологической схемы, общий выход концентрата на фабрике повысился на 2 %, что составило 52400 т в год.

Сепаратор Рефлюкс, относящийся к типу СКП, был разработан Кевином Галвиным совместно с сотрудниками университета Ньюкасла [3]. Он выпускается компанией Ludowici Limited.

Промышленная модель RC1800 имеет размеры 1,8 x 1,9 м в сечении и 3,5 м в высоту.

В конструкции сепаратора Рефлюкс реализована теория осаждения на пластинах, что обеспечивает высокую производительность за счет сгущения материала на ламелях (осадительных пластинах).

Сепаратор состоит из двух частей: нижней — вертикальной разгрузочной зоны и верхней — наклонной, содержащей ряд ламелей. Наклонные каналы увеличивают размер области седиментации внутри сепаратора. Питание подается сбоку в среднюю часть сепаратора ниже верхних наклонных проходных каналов. Вода, подаваемая в нижнюю часть сепаратора, проходит через распределительную пластину вертикальной Ра-

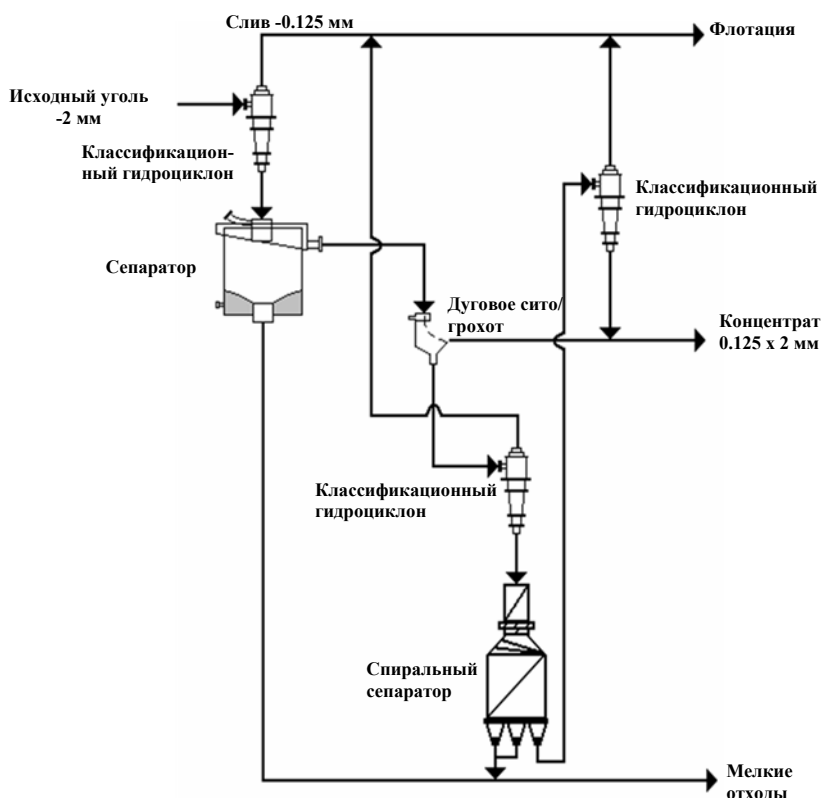


Рис. 4. Схема обогащения угольного шлама на ОФ Bayswater

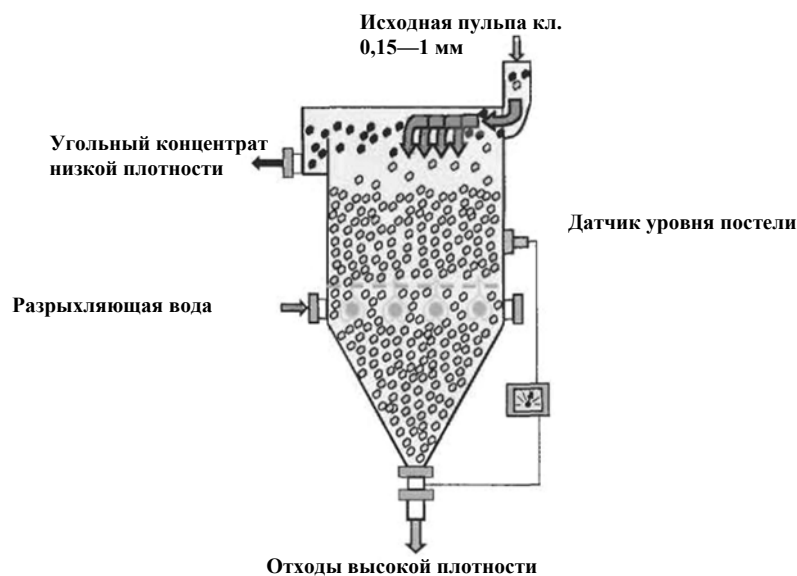
бочей зоны и создает взвешенную постель из частиц высокой плотности, поступающих с питанием. Содержание твердого в питании поддерживается на уровне 50 %. Толщина постели контролируется с помощью датчиков давления, сигналы которых используются для управления нижним разгрузочным клапаном. Таким образом, толщина постели поддерживается на требуемом уровне. Концентратные ламели установлены под углом  $60^\circ$  к горизонтали и с зазором 120 мм. Действующие в каналах между пластинами высокие поперечные силы, удерживают крупные и легкие частицы во взвешенном состоянии, которые током воды выносятся наверх и переливаются в желоб концентрата. Частицы с высокой плотностью, включая и более мелкие, осаждаются на пластинах и сползают по ним, снова попадая в вертикальную секцию, улучшая тем самым характеристики взвешенной постели. В результате улучшения гидродинамических процессов внутри каналов и условий осаждения, повышается извлечение крупных частиц с низкой плотностью в концентрат, также как и извлечение плотных мелких частиц в отходы. Этот двойной эффект позволил увеличить диапазон крупности эффективно разделяемых по плотности частиц.

В опубликованных в 2008 году [5] данных о результатах промышленной эксплуатации, сообщается, что номинальная производительность стандартного сепаратора Рефлюкс RC1800 на угле  $0,25 \times 2$  мм составляет 120 т/ч, с возможностью достижения максимума в 150 т/ч. В зависимости от сечения, стандартная удельная производительность составляет  $35 \text{ т/час} \cdot \text{м}^2$ , что значительно больше, чем у сепаратора Стокс.

Детальные испытания модели RC1800 были проведены на ОФ в Новом Южном Уэльсе (Австралия). На сепаратор подавалось 54 т/ч угля номинальной крупностью  $0,25 \times 2$  мм. В оптимальном режиме плотность разделения  $\rho_{50} = 1,70 \text{ г/см}^3$  и вероятное отклонение  $E_{pm} = 0,15$ . Эффективность разделения, достигнутая на угле крупностью  $0,5 \times 2$  мм (отношение 4:1) была исключительной  $E_{pm} = 0,08$ . При размерах частиц ниже 0,5 мм значение  $E_{pm}$  возросло до 0,15. Также, при отношении крупности частиц около 3:1 возросла и плотность разделения с 1,47 до  $1,60 \text{ г/см}^3$ .



Одной из проблем конструкции сепаратора Стокс является то, что питание вводится в его центральную часть, на определенной глубине от поверхности. Такое конструктивное решение приводит к возникновению турбулентности в зоне, в которой происходит осаждение как мелких, так и крупных частиц высокой плотности на находящуюся во взвешенном состоянии постель. В дополнение к этому, из-за дополнительной гидравлической нагрузки, выше точки ввода питания возрастает скорость восходящего потока воды, что может приводить к выносу вверх вместе с частицами низкой плотности и тяжелых породных частиц. Для борьбы с этим явлением, инженерами компании Eriez Manufacturing (США) была разработана уникальная система мягкой подачи питания через верхнюю часть сепаратора с использованием переходной камеры поперек вертикальному потоку пульпы. Эта технология, как и сепараторы ее использующие, получили название «Кроссфлоу» [4]. Переходная камера увеличивает площадь ввода питания по всей ширине сепаратора, что снижает скорость, а соответственно, и турбулентность (рис. 5). Жидкая фаза питания плавно



**Рис. 5. Схема работы сепаратора Кроссфлоу**

переливается через верх сепаратора в желоб перелива. В результате такой, не погруженной подачи исходного угля внутрь СКП, колебания характеристик питания не влияют на показатели сепарации. Скорость восходящего потока воды постоянна по всей высоте. Установленные на концах патрубков ввода питания дефлекторы, предотвращают прямое попадание твердого в концентратный желоб.

Дальнейшие улучшения включали установку перфорированных пластин на патрубки, через которые вода впрыскивается в рабочую камеру. Впрыск воды осуществляется через патрубки диаметром 12,5 мм, расположенные с интервалом более 150 мм в нижней части квадратной в сечении рабочей камеры. Задача патрубков состоит просто в подводе воды, в то время как перфорированные пластины обеспечивают ее дисперсность.

Например, сепаратор Кроссфлоу, был установлен на ОФ в Центральных Аппалачах (США) вместо спирального сепаратора, обогащавшего уголь крупностью 0,15 x 1 мм. На сепаратор размерами 2,75 x 2,75 м подавалась нагрузка в 200 т/ч, что соответствует удельной производительности 26 т/ч·м<sup>2</sup>. После оптимизации режимов сепаратор выдавал высококачественный концентрат с зольностью 9,5 % при извлечении горючей массы в концентрат на уровне 97,5 % [5].

Другой сепаратор того же типоразмера был установлен на фабрике в Западной части штата Кентукки для обогащения углей Иллинойского месторождения (США). После запуска фабрики зольность концентрата составила 10 % при извлечении горючей массы в концентрат 95 %.

В России на текущий момент отсутствуют данные применения СКП на углеобогажительных фабриках. Известно, что в г.Донецке (Украина) на ОФ «Чумаковская» был установлен сепаратор Стокс для обогащения зернистого шлама коксующегося угля, но в 2005 году этот сепаратор был вырезан из технологической схемы из-за недостатков в работе, в частности из-за постоянной забивки пространства под перфорированной плитой в нижней части сепаратора в месте подачи воды для создания вертикального разрыхляющего потока.

Указанных недостатки отсутствуют в работе сепараторов Кроссфлоу, установленных на новой крупнейшей в Европе обогатительной фабрике «Красноармейская-Западная» (Донецкая обл., Украина), введенной в эксплуатацию в 2009 году. На этой фабрике установлены два сепаратора Кроссфлоу производительностью 150 т/ч каждый для обогащения угля машинного класса 0,15 x 1 мм при плотности разделения ниже 1,6 г/см<sup>3</sup>. Сепаратор Кроссфлоу имеет хорошие показатели работы при любом содержании твердого в оборотной воде и мало чувствителен к колебаниям исходной нагрузки.

Сепараторы с качающейся постелью (СКП) могут служить альтернативой спиральным сепараторам, а в некоторых случаях, работая совместно с ними, позволяют достичь эффективного разделения по низкой плотности. Инновации в конструкции сепараторов Кроссфлоу позволили устранить недостатки обычных сепараторов Стокс.

Наиболее широко СКП применяются для замены спиральных сепараторов, что позволяет исключить зависимость от колебаний нагрузки, как фактора, влияющего на показатели обогащения. Тем не менее, как показано выше, существует проблема сильной зависимости плотности разделения от вариации ситового состава исходного угля. Кроме того, как указывается в данных некоторых фабрик, если спирали и распределительные системы смонтированы правильно, современные спиральные сепараторы обеспечивают более гладкую зависимость плотности разделения при большем диапазоне изменения крупности. Необходимо проведение дополнительных исследований для оценки этих утверждений.

---

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Drummond, R. B., Swanson, A. R., Nicol, S. K. and Newling, P. G., 1998. «Optimization Studies on a 75 t/h Teetered Bed Separator at Stratford Coal Preparation Plant,» Proceedings, XIII International Coal Preparation Congress, Brisbane, Australia, pp. 215 — 225.*

2. Drummond, R. B., Nicol, S. K. and Swanson, A. R., 2002. «Teetered Bed Separators — Australian Experience,» Proceedings, XIV International Coal Preparation Congress, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 353 — 358.

3. Calvin, K. P., Zhou., Belcher, B. D., Pratten, S., Callen, A. M., Lambert, N. and Nguyentranlam, 2004. «Investigation of the Reflux Classifier for Density and Size Separations from Pilot to Full-Scale,» Final Report C11008, C10049, Australian Coal Association Research Program.

4. Kohmuench, J. N., Mankosa, M.J., Honaker, R. Q. and Bratton, R. C., 2006. «Applications of the Crossflow Teetered-Bed Separator in the U.S. Coal Industry,» Minerals and Metallurgical Processing journal, Vol. 23. No. 4, pp. 187—195.

5. Walton, K., Zhou, J. and Galvin, K. P. «Gravity Separation of Flotation Feed using the Enhanced Reflux Classifier,» Australian Coal Preparation Conference, 2008. **IAS**

#### **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,  
Угольный департамент Коралайна Инжиниринг — CETCO.

