



Научная статья
УДК 552.574



<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>

Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов

Сергей Амперович Прокопьев^а

^аИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^бООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в сборе данных и анализе современных тенденций развития гравитационных технологий и оборудования для обогащения угольных шламов. В ходе работы было проведено обобщение научно-технической информации, а также ее анализ. В результате отмечено, что в последние годы предприняты попытки обогащения угольных шламов преимущественно гравитационными методами. Каждый из этих методов включает ряд процессов, основанных на общих физических и физико-химических свойствах, по которым производится разделение материала, а также на отличающихся друг от друга использованием дополнительных разделяющихся силах и соответствующих конструкциях машин и аппаратов. К данным аппаратам относятся тяжелосредные циклоны, винтовые сепараторы, гидросайзеры, концентрационные столы и отсадочные машины. Автором рассмотрены принципы работы перечисленного гравитационного оборудования, а также показаны преимущества и недостатки каждого из этих аппаратов. Приведенные данные свидетельствуют о том, что применительно к настоящему времени оборудованию для обогащения угольного шлама характерны удовлетворительные показатели средневероятного отклонения. Для выявления рациональной топологии схем обогащения конкретного объекта выбирается наиболее оптимальный вид гравитационного оборудования, а также их сочетание в зависимости от характеристики вещественного состава. Анализ данных показал, что наиболее перспективным, высокоэффективным, результативным, экологически чистым и ресурсосберегающим гравитационным методом обогащения является винтовая сепарация.

Ключевые слова: гравитационный метод обогащения, угольные шламы, отсадка, тяжелосредный гидроциклон, гидросайзер, винтовой сепаратор

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Прокопьев С. А. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 458–468. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>.

Original article

Overview of coal sludge gravity concentration technologies

Sergey A. Prokopiev^а

^аInstitute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^аResearch and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to collect data and analyze modern development trends of gravity concentration technologies and equipment for coal sludge enrichment. Conducted generalization and analysis of scientific and technical information allowed to state that some attempts have been made recently to enrich coal slimes using mainly gravity concentration methods. Each of these methods involves a number of processes based on general physical and physicochemical properties serving the criteria for material separation as well as on the differently applied additional separating forces and machinery and apparatus designs. The latter include heavy-media cyclones, spiral separators, hydrosizers, concentration tables and wash boxes. The author considers the operation principle of the listed gravity equipment, demonstrates the advantages and disadvantages of each of the apparatuses. The data given indicate that, modern gravity equipment

© Прокопьев С. А., 2022



used for coal sludge enrichment features satisfactory indicators of the average probable deviation. To identify the rational topology of concentration diagrams for a particular object, the most optimal type of gravity concentration equipment or its combination is selected depending on the characteristics of the material composition. The analysis of data has shown that the most promising, highly efficient, effective, environmentally friendly and resource-saving gravity concentration method is spiral separation.

Keywords: gravity concentration method, coal slimes, jigging, heavy-medium hydrocyclone, hydrosizer, spiral separator

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Prokopyev S. A. Overview of coal sludge gravity concentration technologies. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):458-468. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>.

Введение

Ископаемые угли являются наиболее распространенным видом минерального сырья, выявленным на всех континентах земного шара. Согласно данным государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 г.¹, Россия занимает четвертое место в мире. Большую часть угля потребляют электростанции и металлургическая промышленность страны, а также коммунально-бытовое хозяйство, строительное производство, химическая промышленность.

Кузнецкий угольный бассейн – главный угольный бассейн России. Он расположен на юге Западной Сибири, в основном на территории Кемеровской области (частично на территории Новосибирской области и Алтайского края), в неглубокой котловине между горными массивами Кузнецкого Алатау. Данный угольный бассейн обладает большими запасами высококачественного угля и обеспечивает более половины отечественной угледобычи, в том числе 80 % коксующихся углей. Основными потребителями угля выступают электростанции и металлургическое производство не только внутри страны, но и за ее пределами.

Одной из ключевых проблем региона является возрастающая с каждым годом за счет предприятий угледобычи нагрузка на экосистему. В данных регионах экологическое состояние характеризуется как кризисное и даже катастрофическое, что обусловлено образованием большого количества разнообразных отходов в зависимости от основного вида производства^{2,3} [1].

Горные массы, извлекаемые из угленосных толщ в шахтах и на разрезах, представляют собой природный агрегат угля с вмещающей породой, поэтому с целью повышения качества угольных концентратов требуется удаление из него высокозольной составляющей. Технология и техника обогащения должны обеспечивать максимальное извлечение горючих компонентов в товарный продукт и соответствовать соблюдению всех установленных экологических требований^{4,5}.

Образованные в ходе работ углеобогачительных фабрик гидроотвалы и шламоотстойники также несут в своем составе уголь (технологические потери углеобогачительных фабрик), в связи с чем их можно рассматривать как альтернативный источник получения энергетических и коксующихся концентратов.

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (05.09.2022).

² К 300-летию Кузбасса: история промышленного освоения // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/13345.html> (22.09.2022).

³ Кузнецкий угольный бассейн // Академик [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/54975> (12.09.2022).

⁴ Бедрань Н.Г. Обогащение углей: учебник. М.: Недра, 1988. 206 с.

⁵ Беринберг З. Ш., Благов И. С., Борц М. А. [и др.]. Обогащение углей: справочник / под ред. И. С. Благова. М.: Недра, 1984. 614 с.



Поэтому разработка технологий эффективной переработки угольных шламов является актуальной в настоящее время. Вовлечение угольных шламов в переработку позволит улучшить экологическую обстановку, снизить экономические затраты на содержание и рекультивацию данных объектов.

Гравитационные методы обогащения занимают ведущее место среди других методов в практике переработки добытого угля и накопленных углесодержащих шламовых отходов в гидроотвалах, шламоотстойниках. Для данного метода обогащения контрастным разделительным параметром является плотность минералов, составляющих породу. Высокая производительность гравитационных машин позволяет упрощать схему цепи аппаратов фабрик, более экономично использовать производственные площади и объемы зданий, в результате чего снижаются удельные капитальные затраты на строительство обогатительных фабрик, уменьшается число обслуживающего персонала, понижается себестоимость переработки [2–5]. В качестве среды, в которой осуществляется гравитационное обогащение угля, используются: при мокром обогащении – вода, тяжелые суспензии или растворы; при пневматическом – воздух. Наиболее часто применяется метод мокрого обогащения. Применение пневматического метода резко ограничивает то обстоятельство, что уголь добывается с повышенной влажностью в связи с применением орошения в забое (борьба с силикозом). В связи с данным обстоятельством использование пневматического метода влечет за собой неточностью разделения угля и минеральных примесей [3–5].

Материалы и методы исследования

Цель представленной работы заключалась в изучении теоретических основ практики применения оборудования для реализации гравитационного обогащения угольных шламов. В основу исследований были положены материалы, собранные коллективами отдела комплексного использования минерального сырья Института земной коры Сибирского отделения Российской академии

наук и Научно-производственной компании «Спирит».

Результаты исследования и их обсуждение

Проанализировав публикации, можно сделать вывод о том, что к числу важнейших тенденций поиска технологических решений по обогащению угольных шламов следует отнести развитие технологии их переработки преимущественно гравитационными методами. Исследованиями А. С. Кирнарского и С. А. Лупей [6–8] установлено, что обогащение угля по одному разделительному признаку – плотности разделения частиц – позволяет добиться максимальной эффективности гравитационного обогащения. Для переработки угольных шламов гравитационным методом обогащения наибольшее распространение получили отсадка, обогащение в тяжелых средах, технология винтовой сепарации, гидросайзеры, также известно применение концентрированных столов.

Обогащение углей в отсадочных машинах развивается многие десятилетия. На углеобогатительных фабриках традиционно после грохочения и отделения шлама крупный (10–12...50–80 мм) и мелкий (0,5...10–12 мм) уголь поступает на обогащение в отсадочных машинах. Отсадкой называется процесс разделения угольной смеси по плотности в восходящей и нисходящей струях воды (мокрая отсадка) или воздуха (пневматическая). Чаще всего на углеобогатительных фабриках России применяют мокрую отсадку, так как ее использование дает наилучшие качественно-количественные результаты.

В процессе длительного периода эксплуатации отсадочные машины для обогащения угля постоянно совершенствовались. Принципиальными схемами основных типов отсадочных машин являются следующие: с подвижным решето, поршневая, диафрагмовая, воздушно-золотниковая. Воздушно-золотниковая (беспоршневая) отсадочная машина наиболее совершенна в конструктивном и технологическом отношении для обогащения тонких классов угля. Область ее применения – шламы коксующихся и энергетических углей легкой, средней и трудной обогатимости круп-



ностью 0,15–3 мм⁶⁻⁸.

В отсадочной машине пульсации воды в рабочем отделении создаются периодическим впуском сжатого воздуха в камеру посредством роторного или клапанного золотникового пульсатора. Машины сконструированы с верхним либо с нижним приводом золотниковых устройств, чтобы регулировать частоту подачи воздуха для получения восходящего и нисходящего потоков. При впуске воздуха рабочая среда поднимается вверх, а при выпуске опускается вниз. Воздушные камеры в последних конструкциях машин размещены непосредственно под рабочим решетом. Легкий продукт разгружается со сливом через борт установки, а тяжелый продукт и продукт промежуточной плотности – в щели, расположенные в конце каждого рабочего отделения.

Производительность отсадочной машины Q , т/ч, может быть определена по формуле

$$Q = qF,$$

где q – удельная нагрузка, т/ч·м²; F – рабочая площадь решет, м².

Удельная нагрузка отсадочных машин должна приниматься для крупного угля в размере 15–30 т/ч на квадратный метр сита, для мелкого угля – 15–25 т/ч на квадратный метр сита [9].

Оперативный контроль работы отсадочных машин может осуществляться непосредственно на рабочем месте оператором путем расслоения пробы материала в растворе хлористого цинка (фракционный анализ). Зольность продуктов обогащения зависит от режима работы отсадочных машин и величины засорения посторонними фракциями. Отсадочные машины при обогащении угольных шламов крупностью 0,15–3 мм чаще всего применяются для коксующихся и энергетических углей легкой, средней и трудной обогатимости, при этом плотность разделения составляет 1550–1920 кг/м³. Отсадочные машины характеризуются достаточно высокой производительностью и относительно низкой энергоемкостью. Существенным недостатком

отсадочных машин при обогащении угольных шламов является низкая эффективность обогащения тонких шламов [4].

Одно из ведущих мест в углеобогатительной отрасли занимает обогащение в тяжелых средах. Данный факт обусловлен высокой технологической эффективностью этого процесса. До недавнего времени тяжелосредное обогащение применялось в основном для углей крупных классов в высокопроизводительных барабанных сепараторах, которые представляют собой сосуды, заполненные суспензией и снабженные транспортными устройствами для отдельной выдачи продуктов обогащения. Производительность сепараторов может быть от 95 до 320 т/ч в зависимости от их типоразмеров, крупности исходного угля и его обогатимости.

В настоящее время обогащение в тяжелых средах находит все более широкое распространение и для обогащения труднообогатимых углей мелких классов. Для разделения мелкого угля по плотности в центробежном поле используют тяжелосредные гидроциклоны. Мелкий уголь вместе с суспензией (с определенной скоростью и под давлением) тангенциально вводят в гидроциклон. Плотность разделения угля в тяжелосредном гидроциклоне может быть равна или выше плотности суспензии, подаваемой в него вместе с углем. Частицы угля, плотность которых меньше плотности разделения, удаляются из гидроциклона вместе с суспензией через сливной патрубок, а частицы с большей плотностью разгружаются через песковую насадку гидроциклона. При этом процесс разделения угольной массы происходит с одновременным обессериванием угольной фракции [10].

В исследованиях А. Д. и Д. А. Полулях [11] отмечается широкий диапазон крупности в практике применения тяжелосредных гидроциклонов. Верхний предел крупности может достигать 30, 40 и даже 50 мм для крупнобаритных гидроциклонов (диаметром до 700 мм). Нижний предел крупности традици-

⁶ Бедрань Н.Г. Обогащение углей: учебник. М.: Недра, 1988. 206 с.

⁷ Беринберг З. Ш., Благов И. С., Борц М. А. [и др.]. Обогащение углей: справочник / под ред. И. С. Благова. М.: Недра, 1984. 614 с.

⁸ Обогащение углей методом отсадки // Studfile [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/578102/page:3> (12.09.2022).



онно принимается равным 0,5–0,6 мм. Процесс обогащения в тяжелосредних гидроциклонах может быть осуществлен в одну (разделение на два продукта) либо в две стадии (разделение на три продукта). В последнем случае используются два последовательно установленных гидроциклона и суспензия двух плотностей. Обоснование количества стадий зависит от категории обогатимости угля и установленных требований к качеству продуктов обогащения. Условия разделения частиц обогащаемого угля в тяжелой среде определяется соотношением действующих на частицу сил – силы тяжести и подъемной (архимедовой) силы – с учетом сил сопротивления среды и механического взаимодействия частиц при их соприкосновении. Отмечено, что обогащение в тяжелосредних гидроциклонах может успешно проходить и для шламов крупностью 0,15...3–6 мм коксующихся углей трудной и очень трудной обогатимости, при этом плотность разделения варьирует в пределах 1400–1800 кг/м³ при вероятном отклонении плотности разделения 40–80 кг/м³. По данным литературных источников, этот показатель самый низкий из показателей распространенных в настоящее время способов реализации гравитационного обогащения угольных шламов.

К достоинствам применения технологии обогащения углей в тяжелосредних гидроциклонах можно отнести достаточно высокую точность разделения, эффективное обогащение углей трудной и очень трудной обогатимости, а также высокую точность регулирования плотности разделения. Недостатками же ее можно назвать относительно высокие эксплуатационные затраты (главным образом на электроэнергию и магнетит) и необходимость регенерации магнетитовой суспензии, усложняющую технологическую схему.

Гидросайзеры успешно используются за рубежом более 20 лет. Их применение связано в основном с обогащением зернистых шламов. Разделение минеральных частиц в аппаратах осуществляется по плотности и крупности в стесненных условиях в восходя-

щем потоке воды, создаваемом в рабочей зоне. Гидросайзеры нашли применение за рубежом для извлечения угольной мелочи из отвалов пустой породы, а также угольной мелочи, образуемой при высокомеханизированных методах угледобычи [5].

Исследование литературных источников также показало, что в отечественной практике и в странах бывшего Союза Советских Социалистических Республик имеется информация по анализу испытаний и определенного опыта использования данного вида гравитационного оборудования для обогащения угольных шламов⁹ [5, 12, 13]. Некоторые исследователи называют гидросайзер гидросепаратором [13] или сепаратором с качающейся постелью [12].

Рассмотрим процесс обогащения угольных шламов в гидросепараторе, представляющий собой цилиндрическую камеру, в нижнюю часть которой через распределительное устройство равномерно подается восходящий поток воды, а в верхнюю часть непрерывно загружается угольный шлам с содержанием от 40 до 60 % твердого по массе. По мере попадания частиц в восходящий поток воды происходит их сепарация по размерам и плотности. Фракции исходного материала, имеющие промежуточную плотность, в отличие от угольных и породных частиц удерживаются в потоке воды и формируют псевдооживленный слой на подложке породных фракций, который и поддерживает слой более легкой угольной фракции. При добавлении очередной порции исходного шлама угольная фракция уходит в сливной желоб гидросепаратора. Плотность взвешенного слоя породы промежуточной плотности поддерживается регулируемым сбросом ее избытка через специальный разгрузочный клапан аппарата [13].

Эффективность обогащения шламов в данном случае зависит от стабильной плотности псевдооживленного слоя, что, в свою очередь, обеспечивается постоянной скоростью и равномерностью подачи восходящего потока воды, а также контролем содержания твердого в этом слое. Принцип разделения угольных и породных частиц шлама в гидро-

⁹ На обогатительной фабрике «Распадская» запустили новое оборудование для лучшей переработки ценных марок угля // Издательский дом «Руда и металлы» [Электронный ресурс]. URL: <https://rudmet.net/news/11797> (12.09.2022).



сепараторе основан на осаждении частиц в воде под воздействие силы тяжести. Соотношение между массами частиц в конечном счете и обеспечивает сепарацию угольных и породных частиц с получением кондиционных продуктов обогащения.

На настоящий момент известно, что на отечественной обогатительной фабрике «Распадская» (Кемеровская область) Распадской угольной компании 16 сентября 2021 г. ввели в эксплуатацию новое оборудование – гидросайзер НТBS-3.0 для более эффективного обогащения угля мелкого класса¹⁰. Гидросайзер запустили в работу на третьей секции фабрики, где перерабатывают самые труднообогащаемые угли ценных для металлургов марок КС и К. Новое оборудование способствует обогащению мелкого угля размером 0,15–2 мм, позволяя получить дополнительный концентрат. Инновация уже позволила обогатителям фабрики «Распадская» увеличить выход концентрата на данной секции на 0,3 % в месяц.

Ранее на Центральной обогатительной фабрике «Чумаковская» (Донбасс) был установлен гидросайзер английской фирмы Stokes для обогащения зернистого шлама коксующегося угля [9]. В конце 2005 г. этот сепаратор был вырезан из технологического процесса из-за недостатков в работе, в основном из-за забивки пространства в месте подачи разрыхляющего вертикального потока воды. Тем не менее в течение некоторого времени эксплуатация гидросайзера обеспечивала извлечение качественного угольного концентрата [13].

В. А. Козлов и В. И. Новак [12], анализируя опыт работы гидросайзеров за рубежом, сделали вывод о том, что их достоинство заключается в возможности обогащения углей по низкой плотности разделения менее 1500 кг/м³, а также автоматического регулирования плотности разделения. К плюсам данного оборудования в числе прочего можно отнести относительно высокую удельную производительность. В числе недостатков можно назвать высокую стоимость оборудования, низкую эффективность обогащения углей

трудной обогатимости, потребность в чистой оборотной воде для обеспечения процесса обогащения, узкий класс крупности частиц, эффективно обогащаемых в одном аппарате. Погрешность работы гидросайзеров составляет 70–150 кг/м³ при плотности разделения 1500–2000 кг/м³. Худшие показатели относятся к обогащению более тонких шламов.

Концентрационные столы отлично зарекомендовали себя (с точки зрения технологии) при обогащении мелких классов высокосернистых коксовых углей. На данный момент в России для обогащения углей концентрационные столы не применяют, хотя в 50–60-е гг. прошлого века на ряде обогатительных фабрик Донбасса они использовались [14]. Тем не менее в зарубежной практике концентрационные столы используются в операции обогащения угольных шламов крупностью 0,2...3–6 мм с высоким содержанием серы для удаления пиритной формы серы. Погрешность работы концентрационных столов при обогащении коксующихся углей крупностью -3 мм при плотности разделения 1550–2000 кг/м³ составляет 100–150 кг/м³. Удельная производительность по концентрату – до 1 т/м²·ч. При всех технологических достоинствах концентрационные столы обладают следующими недостатками: эти аппараты, во-первых, чувствительны к колебаниям гранулометрического и фракционного составов исходного угольного продукта, во-вторых, сложны в наладке, эксплуатации и ремонте.

В настоящее время поиск и разработка экономичных методов, позволяющих составить альтернативу флотации при обогащении мелкого угля, является важной технологической и экономической задачей. В последнее десятилетие практически на всех углеобогачительных фабриках России, перерабатывающих коксующиеся угли, выполнена модернизация технологических схем с установкой для обогащения зернистых шламов крупностью 0,15...1–2 мм винтовых (спиральных) сепараторов. Это позволило значительно снизить нагрузку на флотационные отделения фабрик по твердому [3].

¹⁰ На обогатительной фабрике «Распадская» запустили новое оборудование для лучшей переработки ценных марок угля // Издательский дом «Руда и металлы» [Электронный ресурс]. URL: <https://rudmet.net/news/11797> (12.09.2022).



Винтовой сепаратор и винтовой шлюз – это аппараты для гравитационного метода обогащения полезных ископаемых, в которых так же, как и на столах, разделение минеральных частиц происходит в потоках воды малой толщины. Винтовые сепараторы представляют собой неподвижный винтовой желоб, закрученный вокруг вертикальной оси. Поперечное сечение желоба имеет определенную форму в зависимости от крупности обрабатываемого материала. Винтовые аппараты, как правило, комплектуются пульподелителем и пульпоприемником для удобства установки и эксплуатации.

Основными геометрическими параметрами винтовых аппаратов являются диаметр, форма поперечного сечения желоба, шаг, а также количество витков (рис. 1). Влияние указанных параметров винтовых аппаратов на процесс винтовой сепарации минерального сырья установлено экспериментально и подробно проанализировано в работах [15–17].

Принцип работы винтовых аппаратов заключается в следующем. Пульпа с содержанием твердого 15-40 % подается в верхнюю часть желоба. Поток пульпы на поверхности желоба винтового аппарата можно рассматривать как сложное движение двух дискретных потоков: несущей жидкости (воды) и твердой фазы. Разделение минералов происходит

за счет их разницы в плотностях в безнапорном движении пульпы по винтовому желобу. При этом происходит разрыхление, расслоение, перераспределение минеральных зерен по сечению потока на фракции, отличающиеся по плотности и крупности: тяжелые минералы сосредотачиваются у внутреннего борта сепаратора, а легкие – у наружного. Разгрузка продуктов обогащения производится через пульпоприемник, снабженный регулируемым отсекателем тяжелой фракции. Винтовой аппарат снабжен системой смывной воды, которая подается от внутреннего борта под низким давлением, регулируемым вентилем, или самотеком. Стекая по телу желоба, вода способствует очистке тяжелой фракции от примесей легких и граничных по крупности минеральных зерен. На рис. 2 проиллюстрировано распределение материала по поперечному сечению профиля желоба.

Винтовые сепараторы являются популярным гравитационным оборудованием в области обогащения угольных шламов. Закономерность и преимущества применения винтовых сепараторов базируются на низких эксплуатационных затратах при достаточно высокой эффективности разделения исходного угля на фракции различных плотностей, особенно при выделении высокозольных тяжелых фракций. Можно утверждать, что это

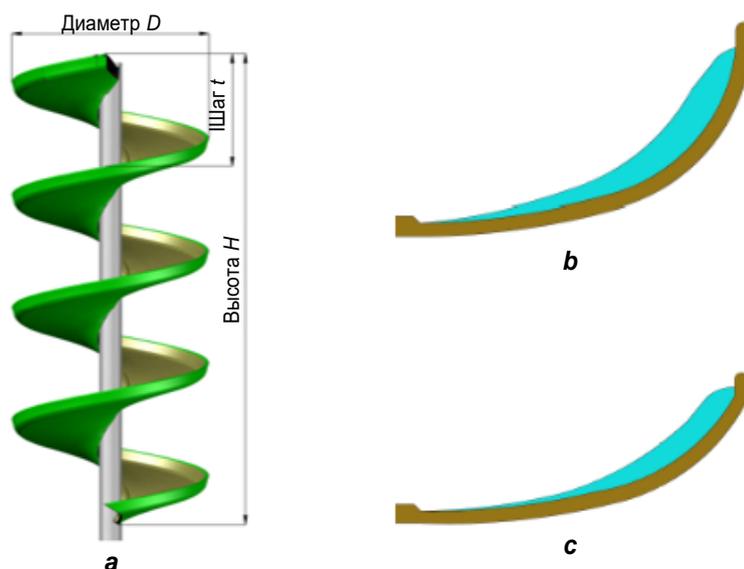


Рис. 1. Геометрические параметры винтового аппарата:

a – общий вид; b – вогнутое поперечное сечение; b – слабовогнутое поперечное сечение

Fig. 1. Geometric parameters of the spiral apparatus:

a – general view; b – concave cross section; c – weakly concave cross section

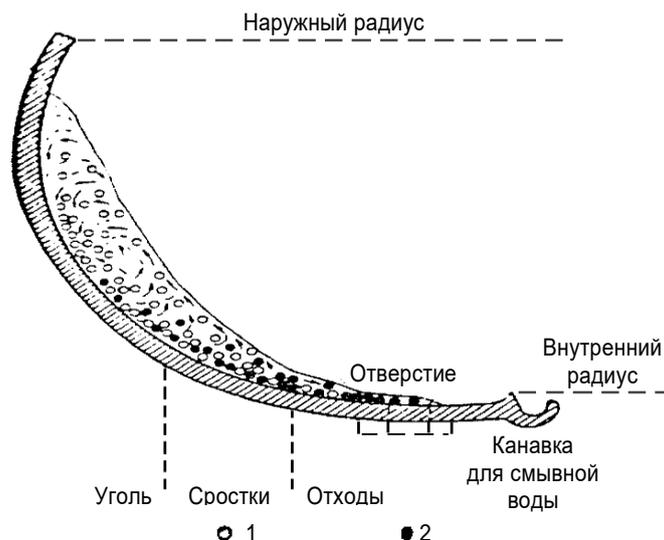


Рис. 2. Поперечное сечение желоба винтового сепаратора:
1 – частицы малого удельного веса; 2 – частицы большого удельного веса
Fig. 2. Cross-section of the spiral separator chute:
1 – particles of small specific gravity; 2 – particles of high specific gravity

наименее затратное оборудование, применяемое в гравитационных процессах обогащения. В нем отсутствуют подвижные части, приемники электроэнергии, не используются реагенты и другие расходные материалы, а процесс разделения происходит при самотеке материала по криволинейной поверхности в результате действия основных сил – гравитационной и центробежной. Нижний предел крупности питания винтовых сепараторов для угля находится диапазоне 0,1–0,15 мм, что дает возможность существенно снизить нагрузку на дорогостоящий и экологически напряженный процесс флотации. Кроме того, процесс винтовой сепарации полностью наблюдаем визуально, его регулирование может производиться без остановки работы аппарата. Использование винтовых аппаратов, бесспорно, относится к энергосберегающим и экологически чистым технологиям [3–5, 15].

В последние годы в России в процессах обогащения угольных зернистых шламов крупностью 0,15–0,2...1–3 мм успешно используются установки из классифицирующего гидроциклона и винтовых сепараторов на вновь строящихся и реконструируемых обогатительных фабриках: «Антоновская», «Кузбасская», «Печорская», «Березовская», «Беловская» и др. [3].

К недостаткам винтовых аппаратов при обогащении угольных шламов можно отнести

снижение эффективности обогащения частиц крупностью менее 0,15 мм, а также относительно невысокую удельную производительность на единицу занимаемой площади по питанию.

Единственным предприятием, которое занимается разработкой и производством винтовых аппаратов для обогащения минерального сырья, включая углесодержащее, в России является Научно-производственная компания «Спирит». В данной компании разработана конструкция винтовых шлюзов с профилем желоба, соответствующим эффективному обогащению угольных шламов.

При обогащении пробы хвостохранилища (гидроотвала) одной из углеобогатительных фабрик Восточной Сибири с применением винтового шлюза без дополнительных затрат на добычу получено качественное вторичное сырье [18, 19].

Исходный материал, зольность которого составила 49 %, по гранулометрической характеристике представлен на 90 % зернами менее 1 мм, причем около 40 % из них составляет глинисто-углистая масса частиц крупностью менее 0,04 мм с зольностью около 70 %. Мелкозернистая часть крупностью более 1 мм с зольностью 16,91 % пригодна для присадки к готовому угольному концентрату, выпускаемому на обогатительной фабрике. Исследование результатов ситового анализа предопре-



делило основные операции технологической схемы испытаний:

– классификацию исходного материала с выделением:

зернистой части исходных шламов крупностью более 1 мм,

класса -1+0,04 мм, являющегося питанием винтового шлюза,

класса -0,04 мм, который выводится методом гидроциклонирования из процесса обогащения в отвал вследствие высокой его зольности;

– основную винтовую сепарацию класса -1+0,04 мм и перечистную – угольного концентрата;

– обезвоживание полученных продуктов обогащения.

В целом по предложенной технологии получено качественное вторичное топливо (класс +1 мм плюс концентрат винтового шлюза) с выходом 39,77 % и зольностью 21,38 %, что соответствует ТУ 12.36.225-91 «Угли ОАО «Востсибуголь» для сжигания на электростанциях», по которым обогащенные угли, получаемые на фабрике, должны иметь значение данного показателя не более 26,5 %. Кроме того, данная технология в процессе обогащения на винтовых шлюзах способствует обессериванию угольного продукта: массовая доля общей серы на сухое состояние топлива в исходном продукте – 1,18 %, в обогащенном угольном концентрате – 0,86 %. Тяжелая фракция винтового шлюза представляет собой породу с зольностью 76,17 % – отвальный продукт, из которого методом магнитной сепарации получен магнетитовый концентрат с содержанием

общего железа 62,1 %, пригодного для возврата на тяжелосреднее обогащение.

Приведенные данные технологических испытаний позволяют констатировать перспективность применения технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов в качестве сырья для получения товарного угольного концентрата на винтовых сепараторах отечественного производства.

Заключение

Результаты проведенной работы, обусловленной актуальностью проблемы переработки угольных шламов, в том числе из гидротвалов, по изучению научно-технической информации, несомненно, иллюстрируют факт того, что гравитационный метод их обогащения является результативным, ресурсосберегающим и экологически чистым. Выбор оборудования (а возможно, и сочетания различных приспособлений) для реализации указанного метода обогащения и топологии технологической схемы переработки угольных шламов определяется данными всестороннего изучения характеристики исходного материала (минералогический, ситовый, фракционный анализы и т. д.), а также требованиями к готовой товарной продукции. Автор статьи считает, что низкие эксплуатационные затраты при довольно высокой эффективности обогащения делают винтовые сепараторы наиболее перспективным видом оборудования для переработки угольных шламов, в том числе накопленных углесодержащих шламовых отходов, возникших в результате деятельности угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.

Список источников

1. Таразанов И. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год // Уголь. 2013. № 3. С. 78–90.

2. Шадрюнова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.

3. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-

технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.

4. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.

5. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. № 51. С. 126–136.

6. Кирнарский А. С. Улучшение гравитационной технологии обогащения хромистых руд // Збагачення



корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 46. С. 93–100.

7. Кирнарский А. С., Лупей С. А. Улучшение сепарационных характеристик гравитационных аппаратов на основе принципа однофункциональности // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 45. С. 71–78.

8. Кирнарский А. С. Принцип однофункциональности разделительных процессов при обогащении каменного угля // Уголь. 2012. № 5. С. 94–96.

9. Самыгин М. А., Золотко А. А., Починок В. В. Отсадка. М.: Недра, 1976. 319 с.

10. Зарубин Л. С., Иофа М. Б. Технология глубокого обогащения и обессеривания угля в тяжелосредних гидроциклонах за рубежом: обзор. М.: ЦНИЭИУголь, 1980. 29 с.

11. Полулях А. Д., Полулях Д. А. Применение тяжелосредних гидроциклонов для обогащения угля // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 47. С. 116–126.

12. Козлов В. А., Новак В. И. Развитие метода качающейся постели в обогащении угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 99–106.

13. Байченко А. А., Евменова Г. Л. Утилизация угольных шламов Кузбасса из наружных отстойников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 4-1. С. 57–60.

14. Букин С. Л., Корчевский А. Н., Шолда Р. А. Комплекс обогащения угольных шламов на основе концентрированного стола // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2010. № 43. С. 54–61.

15. Иванов В. Д., Прокопьев С. А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. М.: Дакси, 2000. 239 с.

16. Аникин М. Ф., Иванов В. Д., Певзнер М. Л. Винтовые аппараты для обогащения руд. М.: Недра, 1970. 181 с.

17. Яшин А. В., Аникин М. Ф., Скрипко В. А. Сепараторщик винтовых аппаратов. М.: Недра, 1984. 102 с.

18. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогатительной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Международ. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.

19. Турецкая Н. Ю., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С. Разработка эффективной низкзатратной технологии получения угольного концентрата и железосодержащего продукта из шламов илов гидроотвала Касьяновской ОФ // XII Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 25–27 февраля 2019 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2019. С. 205–209.

References

1. Tarazanov I. Performance results of Russian coal industry in 2012. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2013;3: 78-90. (In Russ.).

2. Shadrunkova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (on the example of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksinsky Readings – 2017): materials of the International scientific conference*. 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).

3. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern coal sludge concentration methods. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).

4. Belousov V. A. Perspective methods of enrichment of coal slime. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).

5. Sokur A. K. Review of gravitational concentration technologies for coal slimes of non-flotation size. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2012;51:126-136. (In Ukrainian).

6. Kirnarskii A. S. Improvement of gravitational technology of chromium ore beneficiation. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;46:93-100. (In Ukrainian).

7. Kirnarskii A. S., Lupei S. A. Improvement of separation characteristics of gravitational apparatuses based on the single functionality principle. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;45:71-78. (In Ukrainian).

8. Kirnarskii A. S. The principle of single-functionality of separation processes under hard coal beneficiation. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2012;5:94-96. (In Russ.).

9. Samygin M. A., Zolotko A. A., Pochinok V. V. *Jigging*. Moscow: Nedra; 1976. 319 p. (In Russ.).

10. Zarubin L. S., Iofa M. B. *Foreign technology of coal deep enrichment and desulfurization in heavy-medium hydrocyclones abroad: review*. Moscow: Central Research Institute of Economics and Scientific and Technical Information of the Coal Industry; 1980. 29 p. (In Russ.).

11. Polulyakh A. D., Polulyakh D. A. Use of heavy-medium hydrocyclones for coal beneficiation. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;47:116-126.

12. Kozlov V. A., Novak V. I. The development of the method of shaken bed when concentrating coal tailings. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2010;6:99-106. (In Russ.).

13. Baichenko A. A., Evmenova G. L. Recycling of Kuzbass coal sludge from external settling ponds. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;4-1:57-60. (In Russ.).

14. Bukin S. L., Korchevskii A. N., Sholda R. A. Coal



slime enrichment complex based on a concentration table. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2010;43:54-61. (In Russ.).

15. Ivanov V. D., Prokop'ev S. A. *Spiral apparatuses for ore and sand enrichment in Russia*. Moscow: Daksi; 2000. 239 p. (In Russ.).

16. Anikin M. F., Ivanov V. D., Pevzner M. L. *Spiral apparatuses for ore concentration*. Moscow: Nedra; 1970. 181 p. (In Russ.).

17. Yashin A. V., Anikin M. F., Skripko V. A. *Separator of spiral apparatuses*. Moscow: Nedra; 1984. 102 p. (In Russ.).

18. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal washing plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie cht-*

eniya – 2002): materialy Mezhdunar. soveshch. = Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials (Plaksinsky Readings – 2002): materials of the International meeting. 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).

19. Turetskaya N. Yu., Prokop'ev S. A., Prokop'ev E. S. Development of an effective low-cost technology for obtaining coal concentrate and iron-containing product from the silt sludge of the Kasyanovskaya Concentrator hydraulic dump. In: *XII Kongress obogatitelei stran SNG = 12th CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 25–27 February 2019, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISIS); 2019, p. 205–209. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Прокопьев Сергей Амперович,

кандидат технических наук,
начальник отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры, СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
генеральный директор,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
psa@spirit-irk.ru.

Sergey A. Prokopiev,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Managing Director,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
psa@spirit-irk.ru.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил анализ литературы, сбор статистических данных, формулировку научных гипотез, подготовил рукопись к печати.

The author analyzed the literature, collected statistical data, formulated scientific hypotheses and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 21.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 21.10.2022; accepted for publication 25.11.2022.