© В.А. Козлов, Е.Н. Чернышова, 2014

УДК 622.7:658.512: 017.2: 504.064.43; 622.771.6

В.А. Козлов, Е.Н. Чернышова

РАЗРАБОТКА НОВОГО СПИРАЛЬНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ УГОЛЬНОГО ШЛАМА ПРИ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ. ЧАСТЬ II[*]

Существующие конструкции спиральных сепараторов, как одинарных, так и составных, обеспечивают эффективное разделение угля по нижней граничной плотности 1,60. Преимущества использования спиральных сепараторов хорошо известны и включают в себя низкую стоимость и эксплуатационные затраты, простоту и надежность конструкции, возможность обогащать широкий класс крупности шлама. Однако отсутствие возможности разделять уголь при плотностях разделения ниже 1,60 ограничивает применение спиральных сепараторов в обогащении угля.

Австралийская компания «Mineral Technologies» разработала новый спиральный сепаратор LC3, который может работать при границе разделения ниже той, при которой работают существующие в настоящий момент модели. В процессе разработки спиральный сепаратор LC3 прошел все необходимые испытания, его рабочие характеристики сравнивались с существующими широко известными моделями спиральных сепараторов компании «Mineral Technologies»: LD4E, LD7 и LD7RC. Спиральный сепаратор LC3 легко достиг нижней граничной плотности разделения 1,4 при производительности, сопоставимой с производительностью существующих моделей. При этом самое низкое значение плотности разделения, которой достиг 7-витковый спиральный сепаратор LD7RC составило 1,55. В данной статье представлены результаты испытаний нового спирального сепаратора LC3 и его модификации LC35T.

Ключевые слова: спиральный сепаратор, плотность разделения, угольный шлам, класс крупности, зольность, выход концентрата, угольная пульпа.

Был проведен ряд испытаний на питании типа «1» на нескольких спиральных сепараторах, включая LD4E, LD7, LD7RC, и новом сепараторе LC3.

Для сокращения времени испытаний и расходов на фракционный анализ при построении кривых разделения во многих испытательных образцах определялась только зольность. Для большинства испытаний результаты оценивались на основе зависимости зольности концентрата от его выхода. После проведения определенного ряда испытаний на данной модели, в зависимости от результатов, выполнялся фракционный анализ лишь для отдельных эксплуатационных условий.

Следует обратить внимание на то, что пробы были рассеяны по размеру 100 мкм, и результаты касаются только фракций +100 мкм.

Например, опыт № 22 был выполнен на спиральном сепараторе модели LD4E при производительности по питанию 1,5 т/ч (по сухому твердому) и объеме пульпы 7,0 м^3/ч. Образцы исследовали на обогатимость, а кривые разделения показаны на рис. 6, *а*.

Данные, представленные на рис. 6, *б*, показывают, что выход концентрата составил 53%, зольность концентрата – 14%, зольность исходного материала – 33%.

Опыт № 26 провели на спиральном сепараторе модели LD7 при на-

[*] Часть I – ГИАБ № 7, 2014, с. 122–129.

грузке по сухому твердому 1,3 т/ч и 6,3 м³/ч по пульпе. Результаты разделения представлены на рис. 7, *а*.

Данные, представленные на рис. 7, *а*, показывают, что на спиральном сепараторе модели LD7 граничная плотность разделения d_{50} составила 1,62 при погрешности разделения E_p = 0,14.

Зависимость зольности концентрата от его выхода в опыте № 26 показана на рис. 7, *б*.

Данные, представленные на рис. 7, *б*, показывают, что выход концентрата составил 54%, зольность концентрата – 15%, зольность исходного материала – 35%.

Необходимо отметить, что плотность разделения на обоих сепараторах LD4E и LD7 близка к минимально возможной, которую можно получить на практике при работе на этих моделях. Разделитель потока в каждом случае был расположен очень близко к наружной стенке желоба спирального сепаратора, что является пределом для обеих моделей. Следует принимать во внимание, что более низкую граничную плотность разделения нельзя достичь без снижения выхода. Другими словами, чем ниже выход, тем ниже граничная плотность разделения.

Опыт № 24 был проведен на спиральном сепараторе модели LD7RC (составной сепаратор с

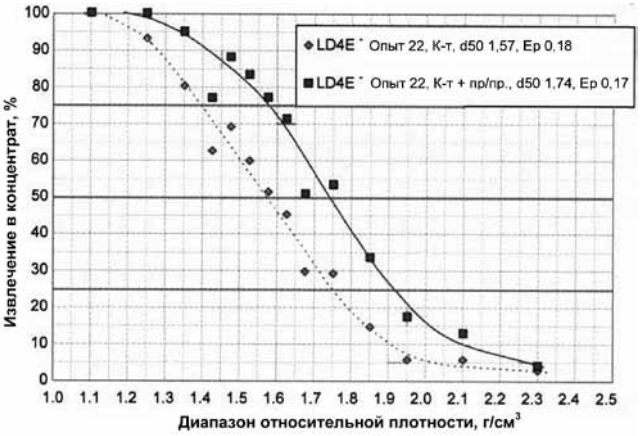

Рис. 6, а. Опыт 22 – Кривые разделения сепаратора LD4E (питание типа «1»)

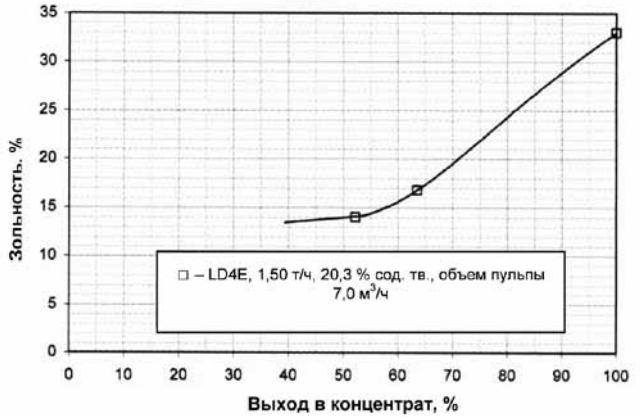

Рис. 6, б. Опыт 22 – Зависимость зольности от выхода сепаратора LD4E (питание типа «1»)

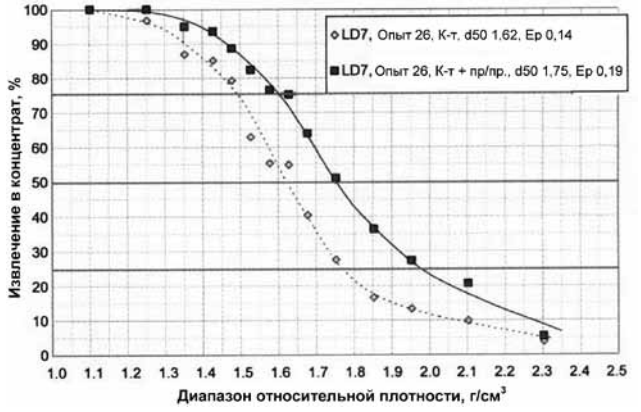

Рис. 7, а. Опыт 26 – Кривые разделения сепаратора LD7 (питание типа «1»)

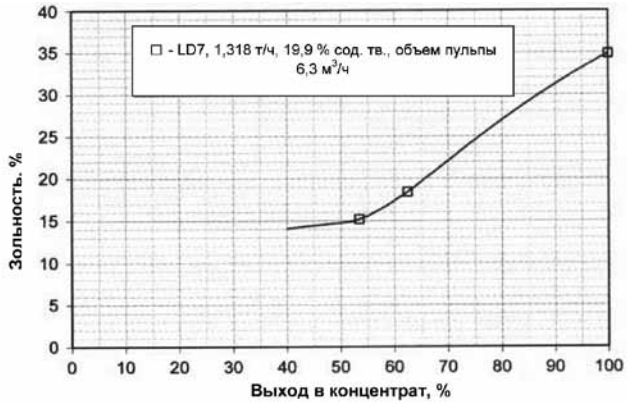

Рис. 7, б. Опыт 26 – Зависимость зольности концентрата от выхода для сепаратора LD7 (питание типа «1»)

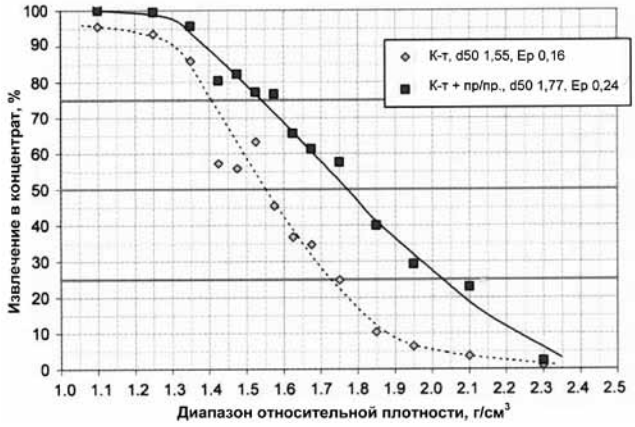

Рис. 8, а. Опыт 24 – Кривые разделения сепаратора LD7RC (питание типа «1»)

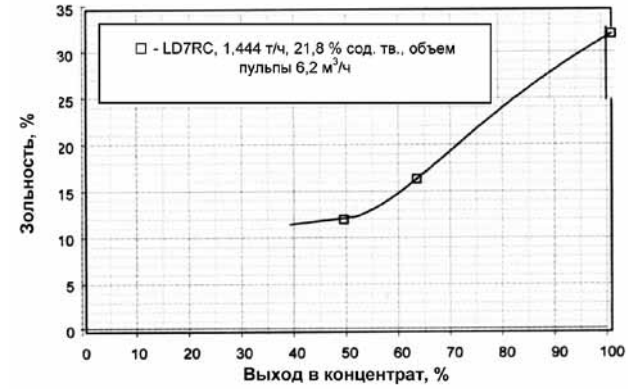

Рис. 8, б. Опыт 24 – Зависимость зольности концентрата от выхода для сепаратора LD7RC (питание типа «1»)

7-ю витками) при производительности по питанию 1,4 т/ч по сухому твердому и 6,2 м^3/ч по пульпе. Кривые разделения для опыта № 24 представлены на рис. 8, *а*.

Данные, представленные на рис. 8, *а*, показывают, что на модели LD7RC достигнута граничная плотность разделения 1,55 при погрешности $E_р$ = 0,16.

Зависимость зольности от выхода показана на рис. 8, *б*.

Данные, представленные на рис. 8, *б*, показывают, что при проведении опыта № 24 на модели LD7RC был достигнут выход концентрата 49%. Зольность концентрата составила 12% при зольности 33% в исходном продукте.

В сравнении с двумя одноступенчатыми спиральными сепараторами, описанными выше, на сепараторе LD7RC была достигнута незначительно меньшая граничная плотность разделения d_{50} и, соответственно, меньший выход концентрата. Также было достигнуто снижение зольности. Более низкая граничная плотность разделения и выход, наряду с пониженной зольностью концентрата 12% являются главными ожидаемыми характеристиками составного спирального сепаратора с 7-ю витками. Одноступенчатые сепараторы LD4E и LD7 состояли из 4 и 5 витков соответственно.

В опыте № 24 был получен более низкий выход

концентрата, чем обычно. Кроме того, данный опыт и два описанных выше проводились при производительности по питанию вблизи нижней границы диапазона (1,3–1,5 т/ч). Более высокая нагрузка увеличит поток у внешней стенки спирали, что в свою очередь приведет к более высокому выходу концентрата и более высокой граничной плотности разделения.

Согласно вышеуказанным результатам, граничная плотность разделения 1,55 оказалась самой низкой, которую можно достичь на доступных в данный момент моделях спиральных сепараторов при строгом контроле условий на испытательном стенде.

Опыт № 78 проводился при нагрузке 1,7 т/ч и 6,8 м^3/ч, а данные о разделении представлены на рис. 9, *а*.

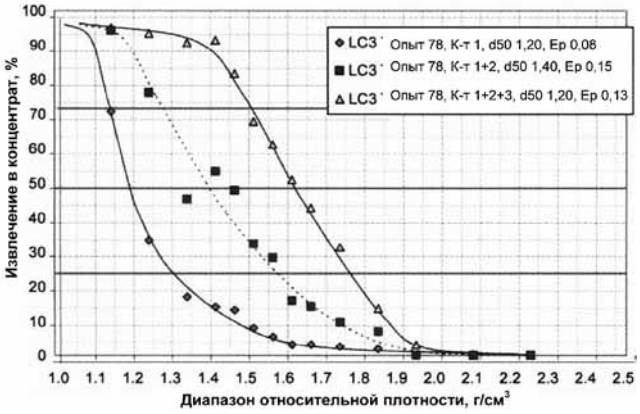

Рис. 9, а. Опыт 78 – Кривые разделения сепаратора LC3 (питание типа 1)

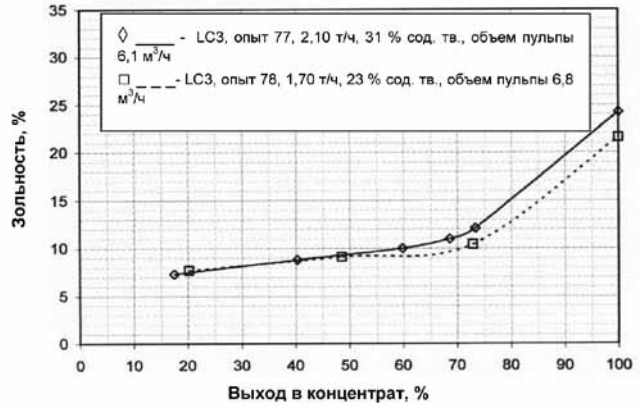

Рис. 9, б. Опыт 78 – Зависимость зольности концентрата от выхода для сепаратора LC3 (питание типа «1»)

Прототип LC3 был оснащен многосекционным выпускным коробом для продуктов. У основания сепаратора разделители делят исходный поток на несколько узких потоков продуктов. Три потока были приняты как предполагаемый концентрат, и кривые разделения, показанные на рис. 9, *а*, построены по характеристикам этих потоков. Очень низкая граничная плотность разделения 1,2 относится к концентрату-1, однако, выход оказывается чрезвычайно низким, несмотря на очень низкую зольность и низкое значение погрешности E_p = 0,08. Плотность разделения для обоих концентратов-1 и -2, рассмотренных вместе, находится ближе к желаемой плотности – 1,40 при E_p = 0,15. Результаты опыта № 78, показанные на рис. 9, *а*, хорошо демонстрируют, что более низкой граничной плотности разделения при одинаковом исходном материале легче достичь на модели LC3 по сравнению с существующими на данный момент моделями.

Рис. 9, *б* демонстрирует зависимость зольности концентрата от его выхода для опытов № 77 и 78.

На рис. 9, *б* видно, что на модели LC3 не сказываются предельные характеристики потока, которые ограничивают работу существующих спи-

Таблица 1

Опыт 78 – Данные по выходу и зольности для сепаратора LC3 (питание типа 1)

LC3, опыт 78, 1,7 т/ч, 23% сод. В., 7,6 м^3/ч, проба питания «1»				
	Частное		**Суммарное**	
Продукт	**Выход, %**	**Зольность, %**	**Выход, %**	**Зольность, %**
К-т 1	20,2	7,3	20,2	7,3
К-т 2	28,3	9,7	48,6	8,7
К-т 3	24,4	12,4	73,0	10,0
Отходы	27,0	47,6	100,0	20,1
Итого:	100,0	20,1		

Таблица 2

Опыт 94 – Данные по выходу и зольности для сепаратора LC35T (питание типа 2)

LC35T, опыт 94, 2,0 т/ч, 7,6 м^3/ч, проба питания «2»				
	Частное		**Суммарное**	
Продукт	**Выход, %**	**Зольность, %**	**Выход, %**	**Зольность, %**
К-т 1	30,6	10,2	30,6	10,2
К-т 2	28,5	15,1	59,1	12,5
К-т 3	15,8	21,4	74,9	14,4
Отходы	25,1	49,4	100,0	23,2
Итого:	100,0	23,2		

ральных сепараторов в способности достигать более низкой плотности разделения и, соответственно, более низкой зольности концентрата. Данные также говорят о том, что чем ближе разделитель потока к внешней стенке спирали, тем значительнее снижение зольности концентрата. Это означает, что плотность отделяемых частиц также постепенно понижается, и упомянутые выше механизмы разделения продолжают действовать в данной наружной области желоба спирали модели LC3. Табл. 1 содержит данные по выходу и зольности для отдельных и суммарных продуктов.

Представленные данные также подтверждают и то, что в сепараторе LC3 частицы угля плотностью 1,2–1,6, попадая в слой пульпы, вступают в контакт с поверхностью желоба спирали и нижними слоями частиц. В других моделях спиральных сепараторов эти частицы остаются во взвешенном состоянии и в режиме «потока в трубе» выносятся по внешнему краю спирали.

Результаты опыта № 78 на модели LC3 показывают, что нагрузка по питанию при этом испытании была ниже, чем в опытах № 22, 24 и 26 на моделях LD4E, LD7 и LD7RC. В опыте № 78 она составила 22%, основываясь на прямом измерении зольности образцов (на рис. 9, *б*) и около 20%, основываясь на обратном расчете по данным о зольности всплывших/потонувших фракций (по табл. 1). Нагрузка по питанию для опытов № 22, 24 и 26 составила около 33–35%. Однако результаты разделения напрямую не зависят от разности в нагрузке

по питанию, а граничная плотность разделения и значение $E_р$ являются подтверждением уникальных возможностей спирального сепаратора LC3.

Дополнительно были проведены испытания на втором типе исходного материала. Был построен второй прототип LC3, на этот раз более короткий, с 5-ю витками, получивший маркировку – LC35T.

Опыт № 94 на модели LC35T проводился при нагрузке 2,0 т/ч, содержании твердого 25% и объеме пульпы 7,6 м³/ч. На рис. 10, *а* показаны кривые разделения, построенные по результатам опыта.

Результаты, представленные на рис. 10, *а*, показывают, что на другом типе исходного материала версия сепаратора LC3 с 5-ю витками также позволила достичь более низкой плотности разделения, в отличие от существующих в данный момент моделей.

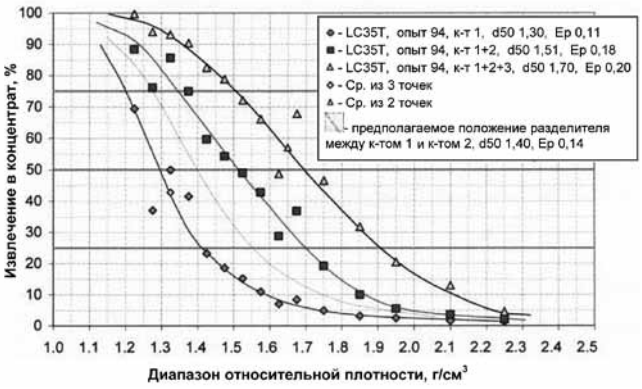

Рис. 10, а. Опыт 94 – Кривые разделения сепаратора 5-тивиткового LC35T (питание типа «2»)

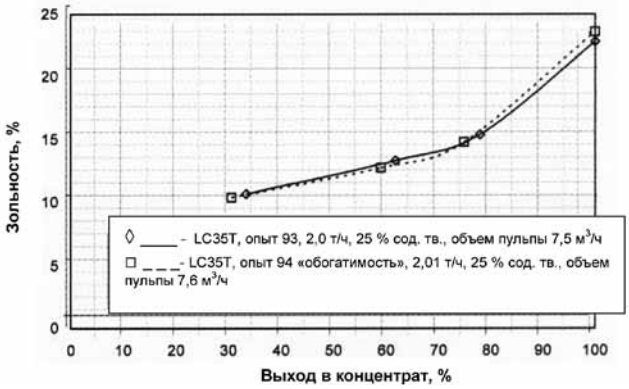

Рис. 10, б. Опыты 93 и 94 – Зависимость зольности концентрата от выхода для 5-тивиткового сепаратора LC35T (питание типа «2»)

Концентрат-1 показал очень низкий выход, а плотность разделения составила 1,3 при погроешности $E_р$ = 0,11. При объединении концентратов-1 и -2 плотность разделения составила 1,51, а значение $E_р$ = 0,18.

Авторы [1], используя общую форму кривых разделения как основу, и математически определив средние точки, попытались спрогнозировать кривую разделения в результате размещения разделителя потока посредине между концентратом-1 и концентратом-2. Это показано пунктирной линией на рис. 10, *а* и означает ожидаемую плотность разделения d_{50} = 1,40 и погрешность $E_р$ = 0,14.

Перед проведением опыта № 94 был организован предварительный тест на отработку условий эксплуатации для испытания на обогатимость. Результаты показаны на рис. 10, *б*.

Результаты, представленные на рис. 10, *б*, показывают, что на работу прототипа модели LC3 с 5-ю витками, как и на саму модель LC3, не так сильно влияют предельные характеристики потока, которые ограничивают работу существующих спиральных сепараторов. По кривым разделения видно, что градиент кривизны смеша-

ется влево, а это значит, что при движении воображаемого разделителя наружу по лотку зольность частиц постепенно снижается, а, следовательно, снижается и их плотность. Табл. 2 содержит данные по частному и суммарному выходам и зольности продуктов, полученных в опыте № 94.

Результаты опыта № 94 обнадеживают, так как прототип LC35T короче прототипа LC3 на 38%. Потребуются дополнительные данные для оценки коммерческого потенциала сепаратора с 5-ю витками. На данном этапе компания «Mineral Technologies» планирует разработать коммерческую конструкцию с 8-ю витками.

Компания «Mineral Technologies» считает текущие результаты обнадеживающими для перехода в стадию промышленных испытаний, несмотря на то, что они еще не являются окончательными. Создано небольшое количество промышленных прототипов, для которых подыскиваются возможности для независимых испытаний на обогатительных фабриках как в США, так и в Австралии.

Выводы

На тестовых исходных материалах спиральный сепаратор LC3 в лабораторных условиях легко достиг граничной плотности разделения 1,4 (и ниже) при эффективности, оцениваемой по E_p, равной, а иногда и лучше той, которую продемонстрировали существующие модели спиральных сепараторов. Самая низкая плотность разделения, которой достигли предыдущие модели спиральных сепараторов, составила 1,55 для 7-мивиткового составного спирального сепаратора LD7RC.

Учитывая эти данные и обоснованные предположения, можно считать, что конструкция спирального сепаратора LC3 имеет все возможности для того, чтобы обеспечить граничную плотность разделения в диапазоне от 1,4 до 1,6 в промышленных условиях.

Плавный режим потока сепаратора LC3 может также способствовать обогащению тонкого угольного шлама класса 50–150 мкм. В ближайшее время будут составлены программы испытаний для исследования потенциала в области обогащения тонкого угольного шлама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palmer M.K., Weldon W.S.* A new low cut point for fine coal separation. / Mineral Technologies Pty Ltd, Gold Coast, Queensland, Australia // CPSA Journal, Winter-2014, v. 12, #4, pp. 27–34.
2. *Holland-Batt A.B.* Spiral separation: theory and simulation. // Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Mineral process. Extr. Metall.). pp. 46–60.
3. *Barbara J., Arnold, Dan Petrunak.* Application for Two-Stage Coal Spirals for Fine and Ultrafine Coal Cleaning. // XV International Coal Preparation Congress And Exhibition, China National Coal Association, Pekin, 2006, pp. 479–488.
4. *Vadim I.N., Vadim A.K., Mikhail F.P.* Cutting Costs of Coal Fines Preparation in Spiral Separators. // XVII International Coal Preparation Congress, Istambul, Turkey, 1–6 october 2013. pp. 231–236.
5. *Новак В.И., Козлов В.А., Пикалов М.Ф.* Схемы СЕТСО для обогащения угольного шлама в спиральных сепараторах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – Отдельный выпуск № ОВ5. – С. 146–154.
6. *Новак В.И., Козлов В.А., Пикалов М.Ф.* Обзор исследований применения спиральных сепараторов для обогащения ультратонкого угля. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – Отдельный выпуск № ОВ5. С. 139–145.
7. *Khoshjavan S., Abshenas M.* Optimization and Increasing of the Coal Separation Efficiency on Coal Preparation Plant Using Coal Spirals. // XVII International Coal Preparation Congress, Istambul, Turkey, 1–6 October 2013. pp. 217–223. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козлов Вадим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
главный технолог, *e*-mail: vak@cetco.ru,
Чернышева Елена Николаевна – кандидат технических наук, инженер-технолог,
ООО «Коралайн Инжиниринг» (CETCO), *e*-mail: info@cetco.ru.

UDC 622.7:658.512: 017.2: 504.064.43; 622.771.6

DESIGN OF A NEW SPIRAL SEPARATOR FOR LOW SEPARATION DENSITY SLURRY COAL BENEFICIATION. PART I

Kozlov V.A., Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Chief Technologist, *e*-mail: vak@cetco.ru,
Chernyshova E.N., Candidate of Engineering Sciences, Engineer-technologist,
Coraline Engineering Ltd. (CETCO), *e*-mail: info@cetco.ru.

The available spiral separators, both single-body and multi-component, ensure efficient separation of coal of density down to lower bound of 1.60. The well-known advantages of spiral separators are low purchase price, low operational cost, simple and reliable design, and beneficiation of slurry within a wide particle size range. However, impossibility to separate coal at separation density under 1.60 restrains application of spiral separators in coal dressing. Australian company Mineral Technologies has designed a new spiral separator LC3 serviceable at the separation density lower than the separation density serviced by the spiral separators in existence. While being designed, the spiral separator passed all the required tests, and its operating performance was compared with operation rating of the known models of spiral separators manufactured by Mineral Technologies: LD4E, LD7 and LD7RC. The spiral separator LC3 readily reached the bottom separation density bound of 1.40 at the capacity comparable with the capacity of the available models. The lowest bound of separation density reached by 7 spiral turn separator LD7RC was 1.55. The article reports the results of testing the new spiral separator LC3 and its modified arrangement LC35T.

Key words: spiral separator, separation density, coal slurry, size grade, ash content, concentrate yield, coal pulp.

REFERENCES

1. Palmer M.K., Weldon W.S. A new low cut point for fine coal separation. / Mineral Technologies Pty Ltd, Gold Coast, Queensland, Australia. *CPSA Journal, Winter-2014*, v. 12, no 4, pp. 27–34.
2. Holland-Batt A.B. *Spiral separation: theory and simulation.* Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Mineral process. Extr. Metall.), pp. 46–60.
3. Barbara J., Arnold, Dan Petrunak. Application for Two-Stage Coal Spirals for Fine and Ultrafine Coal Cleaning. *XV International Coal Preparation Congress And Exhibition*, China National Coal Association, Pekin, 2006, pp. 479–488.
4. Vadim I.N., Vadim A.K., Mikhail F.P. Cutting Costs of Coal Fines Preparation in Spiral Separators. *XVII International Coal Preparation Congress*, Istambul, Turkey, 1–6 october 2013, pp. 231–236.
5. Novak V.I., Kozlov V.A., Pikalov M.F. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 2012, special issue no OV5, pp. 146–154.
6. Novak V.I., Kozlov V.A., Pikalov M.F. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 2012, special issue, no OV5, pp. 139–145.
7. Khoshjavan S., Abshenas M. Optimization and Increasing of the Coal Separation Efficiency on Coal Preparation Plant Using Coal Spirals. *XVII International Coal Preparation Congress*, Istambul, Turkey, 1–6 October 2013, pp. 217–223.