

УДК 621.928.4 © Т. Орупольд, Д. Старр, А. Лейфрид, В. Титов, В. Кокшаров, 2021

Пластинчатый классификатор REFLUX™ с высокой скоростью сдвига (повышение эффективности обогащения)

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-72-77>**ОРУПОЛЬД Т.***FLSmidth Pty Limited,
4300, г. Квинсленд, Австралия***СТАРР Д.***FLSmidth Pty Limited,
4300, г. Квинсленд, Австралия***ЛЕЙФРИД А.***FLSmidth Россия,
127030, г. Москва, Россия***ТИТОВ В.***FLSmidth Россия,
127030, г. Москва, Россия***КОКШАРОВ В.***FLSmidth Россия,
127030, г. Москва, Россия*

В настоящей статье рассматривается промышленная разработка технологии гравитационной сепарации мелких частиц с использованием пластинчатого (ламельного) классификатора REFLUX™ с высокой скоростью сдвига (классификатор REFLUX™) с акцентом применения преимущественно на угле. Классификатор REFLUX™ представляет собой установку, использующую флюидизационную постель и включающую систему близко расположенных параллельных наклонных каналов, находящихся над флюидизационной постелью. Данные каналы позволяют добиться значительного подавления влияния крупности частиц, что приводит к высокоэффективному разделению на основе плотности. продемонстрировано, что улучшенные характеристики гравитационной сепарации являются чрезвычайно высокими, со значительным снижением изменения плотности разделения в зависимости от крупности частиц и значительным уменьшением изменения вероятной погрешности отклонения (E_p) с изменением крупности.

Первые промышленные испытания полномасштабных классификаторов REFLUX™ с применением на угле были проведены в конце 2009 года. Позднее данная технология была применена для сепарации тонких частиц при добыче полезных ископаемых, а в Южной Африке эксплуатируется ряд полномасштабных установок на производствах по добыче хрома. Первоначально опытно-промышленные установки (как правило, RC™300) прошли испытания на фабриках по добыче железной руды, минеральных песков и марганца наряду с другими полезными ископаемыми, обычно после того, как с помощью других технологий не удалось достичь желаемых результатов. В настоящее время ряд лабораторий по всему миру проводят дополнительные испытания в области применения на полезных ископаемых (минеральном сырье).

В настоящее время более 70 установок RC™ работают на угле и минеральном сырье, в том числе и в России. В настоящей статье представлена технология классификатора REFLUX™, определены области промышленного применения и приведены некоторые коммерческие результаты.

Ключевые слова: гравитационная сепарация, классификация, флюидизационная постель.

Для цитирования: Пластинчатый классификатор REFLUX™ с высокой скоростью сдвига (повышение эффективности обогащения) / Т. Орупольд, Д. Старр, А. Лейфрид и др. // Уголь. 2021. № 5. С. 72-77. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-72-77.

ВВЕДЕНИЕ

На рис. 1 представлен общий вид классификатора REFLUX™. При переработке угля гравитационная сепарация тонких частиц (как правило, крупностью менее 2 мм) обычно осуществляется в воде с использованием различных установок гравитационной сепарации, в том числе спиральных классификаторов и опций классификаторов с восходящим потоком. Цель этого процесса заключается в разделении материала на основе плотности частиц, в идеале частицы ниже целевой плотности должны находиться в пределах одного потока, а частицы с более высокой плотностью представляют собой второй поток. На практике, когда диапазон

крупности частиц питания увеличивается, общая эффективность разделения значительно снижается. При ориентации на заданное содержание ценного компонента в продукте данная потеря эффективности является непосредственной причиной снижения извлечения ценного компонента. Эффективность сепарации широкого диапазона крупности частиц на основе плотности частиц в жидкости с низкой плотностью, такой, как вода, остается серьезной проблемой.

Наблюдается растущая тенденция к замене существующих технологий обогащения мелкозернистых минералов и угля с номинальной крупностью менее нескольких миллиметров на технологии, основанные на использовании флюидизационной постели. Как правило, флюидизационная постель склонна к гидравлическим ограничениям и ограничениям по условиям подачи питания, и, следовательно, питание должно быть как можно более концентрированным для достижения максимальной пропускной способности. Тем не менее классификатор REFLUX™ FLSmidth обеспечивает гораздо более высокую гидравлическую мощность за счет использования параллельных наклонных пластин в конструкции корпуса флюидизационной камеры, и, следовательно, для данной установки требуется гораздо меньшая площадь основания в пространстве фабрики.

Классификатор REFLUX™ (RC™) представляет собой инновационную установку, предлагающую ряд преимуществ как при гравитационной сепарации, так и при классификации по крупности частиц. Установка включает комбинацию обычной флюидизационной постели и комплектов параллельных наклонных пластин, как показано на рис. 2.

Пульпа питания поступает под пластины, а флюидизационная вода подается через распределительную пластину в основании. Пульпа питания перемещается вниз в емкость, образуя слой (постель) частиц, флюидизируемый снизу. Частицы с высокой плотностью оседают в нижней части постели, а легкие и тонкие частицы переносятся вверх, причем большая часть перемещается к ламельным пластинам. Высокая гидравлическая нагрузка



Рис. 1. REFLUX™. Классификатор FLSmidth RC2020™. Общий вид

ка переносит суспензию вверх на параллельные наклонные ламельные пластины. Здесь частицы, осаждающиеся более медленно, которые не могут осесть под действием флюидизационной воды, проходят через пластины и попадают в слив. Частицы, осаждающиеся быстрее, покидают суспензию и оседают на пластинах, а затем соскальзывают обратно в нижнюю часть.

При высоких концентрациях постели в зоне орошения данная отделяемая суспензия обеспечивает инициированный процесс внутри классификатора, обеспечивая сепарацию в значительной степени на основе плотности. Когда плотность флюидизационной постели превышает заданное значение, у основания установки открывается задвижка, и происходит разгрузка некоторой части бо-

лее плотных частиц в виде потока песков.

Наклонные каналы, геометрия которых определяется длиной пластины L , расстоянием между перпендикулярными каналами z и углом наклона к горизонтали h (рис. 3), обеспечивают значительное гидравлическое преимущество перед традиционными типами флюидизационной постели, что согласуется с хорошо известным «Эффектом Бойкотта» (Boycott, 1920; Ponder, 1925; Nakamura and Kuroda, 1937; Zhou et al.; 2006) и демонстрирует, что в диапазоне $h = 60-80$ градусов производительность была оптимальной, следовательно, работа всех установок с того времени основана на угле наклона 70 градусов.

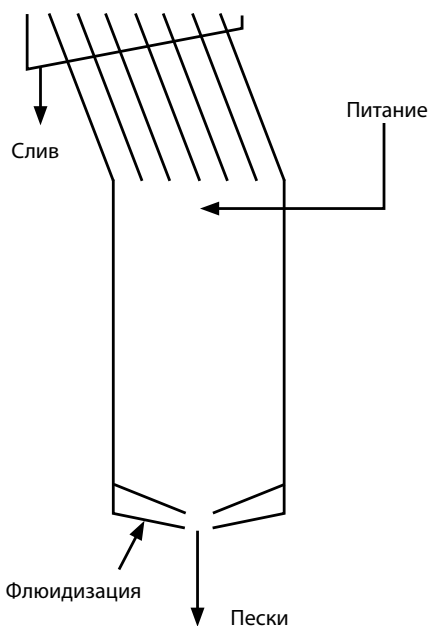
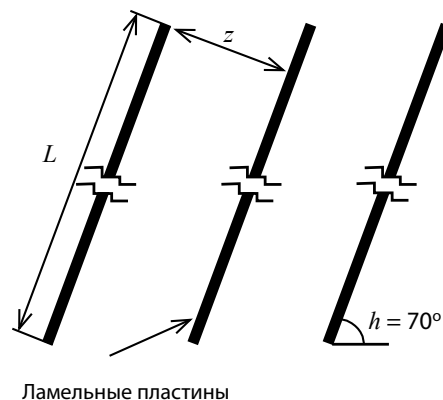


Рис. 2. Схематическое изображение классификатора REFLUX™

Рис. 3. Конфигурация ламельных пластин



Сдвиг D_{50} с изменением крупности для RC™2020

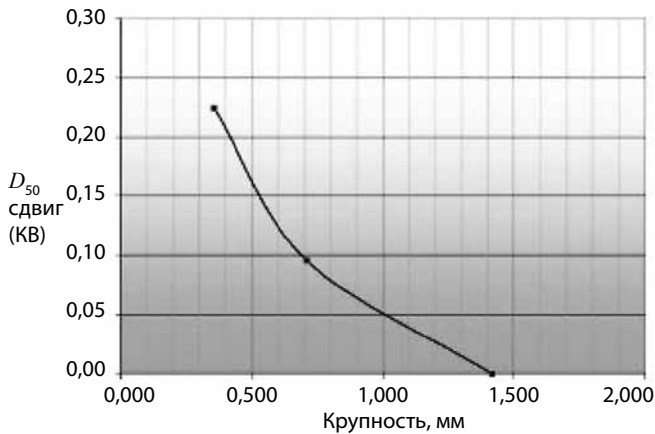


Рис. 4. Сдвиг D_{50} с изменением крупности для RC™2020 при обогащении углей

Изменение E_p RC™2020 в зависимости от крупности

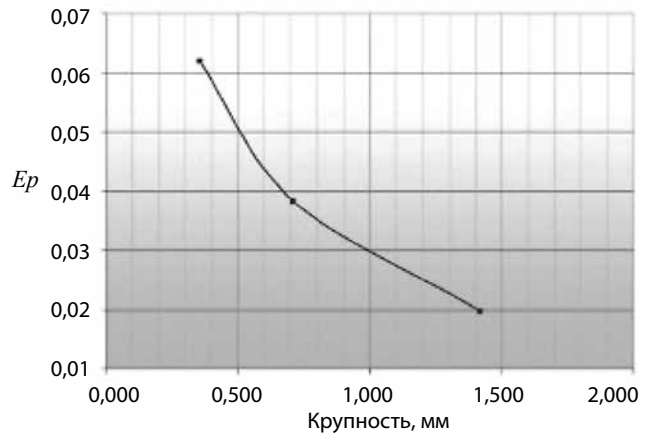


Рис. 5. Изменение E_p RC™2020 в зависимости от крупности частиц при обогащении углей

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА REFLUX™

Поскольку фундаментальные исследования финансировались австралийской угольной промышленностью, все первоначальные испытания и последующие работы на опытно-промышленных и полномасштабных установках выполнялись на австралийских углях. Испытания на минеральном сырье начались в Южной Африке через много лет после разработки первых промышленных установок. Поэтому все подробности разработки в настоящей статье основаны на данных эксплуатации на австралийских углях.

Следующим шагом после лабораторной и теоретической проработки (Galvin and Nguyentranlam, 2002; Galvin et al., 2002 a, b) технологии классификаторов REFLUX™ было проведение эксплуатационных испытаний промышленных установок.

В 2005 г. была выполнена оценка эксплуатационных характеристик полномасштабного классификатора REFLUX™ первого поколения (RC™1800) с использованием угля и минерального сырья с номинальной крупностью менее 2 мм. Установка была смонтирована, введена в эксплуатацию и исследована на углеобогадательной фабрике «Lower Hunter Valley». Пластины имели наклон под углом 60 градусов к горизонтали и установлены с шагом 120 мм.

В конце 2008 г. дальнейшие исследования, выполненные профессором Кевином Галвином (Galvin et al., 2010), показали, что эффективность может быть значительно увеличена за счет уменьшения расстояния между каналами ламельных пластин. На основании данного результата было выполнено повторное проектирование классификатора REFLUX™, и модель RC™2020 стала первой в линейке установок новой конструкции.

В конце 2009 г. была выполнена оценка эксплуатационных характеристик полномасштабного классификатора RC™2020 на углеобогадательной фабрике в Центральном Квинслен-

де, Австралия. В данной установке наклонные пластины были смонтированы под углом 70 градусов к горизонтали и с шагом 6 мм.

Результаты испытаний 2005 и 2009 годов представлены Т. Орупольдом и др. (2013). RC™2020 продемонстрировал значительно более низкие значения E_p и сокращение сдвига D_{50} в зависимости от крупности. Результаты испытаний RC™2020 представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 представлен относительно умеренный сдвиг D_{50} с изменением крупности частиц в сравнении с другими технологиями. Из рис. 5 следует, что значения E_p продолжают сохраняться на очень низком уровне даже при малой крупности частиц.

Впоследствии классификатор RC™2020 стал основной используемой установкой, и за три года по всему миру было продано более 40 классификаторов. Модель RC™2020 сменила модель RC™2000 (рис. 6).



Рис. 6. Заводская тестовая сборка RC™2000 REFLUX™ перед поставкой

Возможности операционных процессов классификаторов RC™2020 и RC™2000 в целом равнозначны. На основании обратной связи, полученной с производств по всему миру, модель RC™2020 была доработана до RC™2000 для включения в нее различных усовершенствований с целью улучшения подготовки и распределения питания внутри установки, а также других улучшений для защиты каналов ламельных пластин, включая внутреннюю защиту от надрешетного продукта и деаэрацию. Последние являются дополнительными функциями безопасности и не препятствуют установке внутризаводской защиты от надрешетного продукта и деаэрации питания. Корпус классификатора RC™2000 выполнен полностью из нержавеющей стали 304 с износостойкой футеровкой деталей в зонах повышенного износа.

Дальнейшие усовершенствования конструкции каналов позволят RC™2000 получить преимущество в части увеличения пропускной способности на 15% по сравнению с моделью RC™2020 аналогичного размера. В настоящее время компания FLSmidth, которая приобрела «Ludowici Australia (Pty) Ltd» в 2012 г., производит промышленные установки с размерами от RC™850 до RC™3000, все они основаны на конструкции RC™2000. Также для внутризаводских испытаний имеется опытно-промышленная установка RC™300, представляющая собой опытную установку, имитирующую запуск одного спирального классификатора. Установка является уменьшенной копией полномасштабного промышленного классификатора RC™2000 в масштабе 1/36, хотя она имеет примерно такую же высоту. Многие конструктивные особенности аналогичны промышленным установкам, включая ламельные пластины, датчики давления и флюидизационные форсунки. Доступен ряд конфигураций песковых задвижек для различных применений. В настоящее время более 24 классификаторов RC™300 используются на угле и полезных ископаемых в шести странах мира. На рис. 7 представлена модель RC™300.



Рис. 7. Опытно-промышленный классификатор REFLUX™ RC™300

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ УГЛЕЙ

Классификаторы FLSmidth® RC™300 REFLUX™ широко используются для опытно-промышленных испытаний на объектах. Классификаторы RC™2020, а в последнее время и RC™2000, были установлены на новых и действующих производствах в Австралии, Новой Зеландии, Китае, Индии, США, Мозамбике и Южной Африке. Более крупные установки RC™2350 были введены в эксплуатацию в августе 2013 г. в Австралии, классификаторы RC™3000 были введены в эксплуатацию в Мозамбике в 2014 г. и в России в 2019 г. На ряде фабрик смонтировано более шести установок (рис. 8).

Большинство случаев применения – в качестве установок первичной сепарации, хотя ряд классификаторов был установлен в качестве контрольных установок для извлечения угля, потерянного в ходе других процессов.

Классификатор REFLUX™ (рис. 9) предназначен для обработки угля крупностью -2,00 мм и эффективен при крупности до 0,125 мм. Тем не менее, как отмечено профессором



Рис. 8. Разгрузка концентрата (обогащение углей)



Рис. 9. Общий вид установки REFLUX™ классификаторов (обогащение углей)

Кевином Галвином и др. (2010), классификатор REFLUX™, аналогично другим установкам гравитационной сепарации, может демонстрировать сдвиг точки отсечения по крупности. Данный эффект отчетливо виден при более мелких фракциях. Следовательно, типовая целевая фракция имеет соотношение размеров верхнего и нижнего пределов крупности 8:1. В Австралии это, как правило, -2,00 мм +0,250 мм. В США установки работают на более тонком материале (-1,00 мм + 0,150 мм) (Ghosh et al., 2012).

В 2008 г. исследовательская программа австралийской угольной ассоциации (ACARP) опубликовала отчет о расширении числа фракций крупности, которые могут обрабатываться в классификаторе REFLUX™. Используемая для данного исследования опытная установка RC600 успешно расширила диапазон крупности надрешетного продукта до 8 мм. Следующий проект в 2014 г., финансируемый ACARP, направлен на расширение диапазона крупности классификаторов REFLUX™ до размера верхнего продукта 4 мм на полномасштабной демонстрационной установке в г. Хантер-Вэлли, Новый Южный Уэльс, Австралия. Данное исследование проводится независимо от FLSmidth.



Рис. 10. Установка REFLUX™ классификатора на углеобогащательной фабрике

В настоящее время, Российский офис компании FLSmidth также владеет опытно-промышленной установкой RC™300, представляющей собой мобильную самостоятельную единицу оборудования для проведения испытаний при внедрении в действующую производственную схему обогатительных фабрик (рис. 10).

На основании проведения таких испытаний, в 2019 г. впервые в России на обогатительной фабрике «Тугнуйская» был введен в эксплуатацию классификатор RC™3000. Затем в 2020 г., после проведения успешных опытно-промышленных испытаний, ЦОФ «ММК-Уголь» внедрила в свое производство два

классификатора RC™1750, что позволило производить обогащение шламов в полном объеме и получать достойные результаты в качественных показателях продуктов обогащения.

Компания FLSmidth не останавливается на достигнутых результатах и постоянно совершенствует свои наработки в области обогащения материалов. Конструкция классификатора REFLUX™ позволяет существенно повысить производительность фабрики за счет извлечения тонкого материала неизвестными до этого способами. Он имеет меньшую площадь у основания при монтаже, что позволяет устанавливать его в условиях ограниченного пространства на существующих фабриках. REFLUX™ использует минимальное количество энергии и оборотной воды для эффективного извлечения ранее отработанного материала. Все компоненты классификатора REFLUX™ спроектированы с учетом минимизации износа и снижения затрат на техническое обслуживание.

В 2020 г. в конструкцию классификатора REFLUX™ внесли несколько изменений, позволяющих сделать эксплуатацию классификатора более удобной для наших заказчиков. Основные изменения коснулись загрузочного устройства классификатора, которое позволяет более качественно осуществлять загрузку материала, следить за наличием негабаритного материала, выводить его из процесса и другие технические нововведения (рис. 11).

ВЫВОДЫ

Установка RC™ обычно используется для обработки минерального сырья крупностью -2 мм, когда существует разница в плотности частиц ценного минерала и пустой породы.

Применение пластинчатого классификатора REFLUX™ с высокой скоростью сдвига способствовало значительному улучшению характеристик сепарации и привело к широкому распространению технологии, которая стала коммерчески доступной только с 2010 г. в виде предпочтительного гравитационного сепаратора для применения на угле, в частности, для точек разделения ниже 1,80.

Классификатор REFLUX™ может перерабатывать угли при более низких точках отсечения и с более высокой эффек-

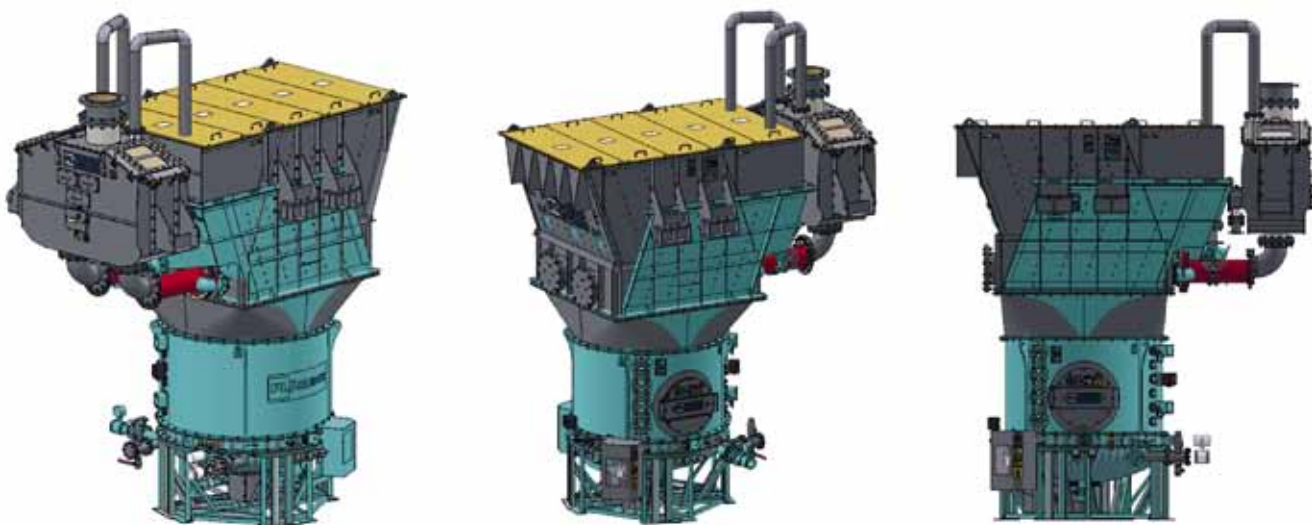


Рис. 11. Общий вид установки REFLUX™ классификаторов нового поколения

тивностью, тем самым обеспечивая получение продуктов с более низкой зольностью в сочетании с улучшенными показателями выхода.

Классификатор REFLUX™ был установлен на ряде производств по добыче полезных ископаемых по всему миру. На сегодняшний день все данные являются конфиденциальными; тем не менее все результаты демонстрируют, что технология пластинчатого классификатора REFLUX™ с высокой скоростью сдвига хорошо подходит для добычи полезных ископаемых и в некоторых случаях может обеспечить отличную сепарацию там, где другое оборудование не может достичь целевых показателей содержания ценных компонентов и извлечения.

Компания FLSmidth стремится преодолеть проблему недостатка и отсутствия данных, пригодных для пу-

бликации, путем инвестиций в лабораторные и опытно-промышленные испытания в своем исследовательском центре в г. Солт-Лейк-Сити, штат Юта. FLSmidth также может проводить тестирования и рекомендовать технологические схемы с учетом требований заказчиков.

Отсутствие конкретных данных в настоящей статье в значительной степени связано с текущими глобальными экономическими условиями, поскольку все конечные пользователи данной технологии наложили запрет на публикацию результатов и идентификацию установок в связи с попыткой достичь преимуществ на рынке. Авторы призывают потенциальных конечных пользователей проводить собственные тестирования новых полезных ископаемых и искать новые области промышленного применения данных установок.

Original Paper

UDC 621.928.4 © T. Orupold, D. Starr, A. Leyfried, V. Titov, V. Koksharov, 2021
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2021, № 5, pp. 72-77
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-72-77>

Title
THE LAMELLA HIGH SHEAR RATE REFLUX™ CLASSIFIER

Authors'
 Orupold T.¹, Starr D.¹, Leyfried A.², Titov V.², Koksharov V.²
¹ FLSmidth Pty Limited, Queensland, 4300, Australia
² FLSmidth Russia, Moscow, 127030, Russian Federation

Abstract
 This paper reviews the industrial development of the fine particle gravity separation technology using the REFLUX™ plate-type (lamella) high-shear-rate classifier (REFLUX™ classifier) focusing mainly on coal applications. The REFLUX™ classifier is a fluidized bed separator with a set of parallel inclined channels located above the fluidized bed. These channels enable effective suppression of particle size effects, which results in highly efficient density-based separation. The improved gravity separation performance is demonstrated to be extremely efficient, with a significant reduction in the change of the separation density as a function of particle size and a considerable decrease in the change in probable deviation error (Ep) with changes in particle size. The first commercial trials of the REFLUX™ full-scale classifiers were carried out at the end of 2009 using coal as the feed material. More than 70 RC™ units are now in operation for coal and minerals classification,

including those in Russia. This paper presents the REFLUX™ classifier technology, identifies industrial applications and provides some commercial results.

Keywords
 Gravity separation, Classification, Fluidized bed.

For citation
 Orupold T., Starr D., Leyfried A., Titov V. & Koksharov V. The lamella high shear rate REFLUX™ classifier. *Ugol'*, 2021, (5), pp. 72-77. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-72-77.

Paper info
 Received March 11, 2021
 Accepted April 15, 2021

COAL PREPARATION