

УДК 66.08

Сабиров Батырбек Зулумович,
кандидат технических наук техника илимдеринин кандидаты
Джапарова Шакархон,
кандидат химических наук
Азизова Айзат Камалидиновна,
ст.лаб.лаборатории

**ИССЛЕДОВАНИЕ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ КАРА-ДОБО И ВЛИЯНИЕ
ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА НА ОБОГАТИМОСТЬ.**

Сабиров Батырбек Зулумович,
техника илимдеринин кандидаты
Джапарова Шакархон,
химия илимдеринин кандидаты
Азизова Айзат Камалидиновна,
ага лаборант

**КАРА-ДӨБӨ КӨМҮРЛӨРҮН КУРГАК БАЙЫТУУ ЖАНА ФРАКЦИЯЛЫК
КУРАМДЫН БАЙЫТУУГА ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИН ИЗИЛДӨӨ.**

Sabirov Batyrbek Zulumovich,
Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory
Japarova Shakarkhon,
Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory
Azizova Aizat Kamalidinovna,
Senior Laboratory Assistant, Laboratory

**STUDY OF DRY BENEFICIATION OF KARA-DOBO COALS AND THE INFLUENCE
OF FRACTIONAL COMPOSITION ON ENRICHABILITY**

*Институт природных ресурсов им. А.С. Джаманбаева ЮО НАН КР ПКР
Ош, Кыргызская Республика*

*КРП КР УИА ТБ А.С. Джаманбаев ат. Жаратылыш байлыктары институту,
Ош, Кыргыз Республикасы*

*Institute of Natural Resources named after A.S. Dzhamanbaev SB NAS KR PKR,
Osh, Kyrgyz Republic*

Аннотация. В настоящем исследовании проанализированы современные методы сухого обогащения, влияние фракционного состава на эффективность процессов, оптимальные технологические параметры и перспективы сухого обогащения углей месторождения Кара-Добо.

Ключевые слова: сухое обогащение, уголь, Кара-Добо, пневматическое обогащение, псевдоожиженный слой, сепарация, фракция угля, плотность угля, обогатимость.

Аннотация. Бу изилдөөдө Кара-Добокенин көмүрлөрүн кургак кыкмачен байытуу боюнча заманбап кыкмалар, фракциялык курамдын процесстердин натыйжалуулугунатийгизген таасири, оптималдуу технологиялык параметрлер жана кургак байытуу кыкмачынын өнүгүүкө лектекталданган.

Негизгисөздөр: кургак байытуу, көмүр, Кара-Добо, пневматикалык байытуу, жалган суюктук катмары, сепарация, көмүр фракциясы, көмүрдүн тыгыздыгы, байытууга жөндөмдүүлүк.

Annotation. This study analyzes modern methods of dry coal beneficiation, the influence of fractional composition on process efficiency, optimal technological parameters, and the prospects for dry beneficiation of coals from the Kara-Dobo deposit.

Keywords: dry beneficiation, coal, Kara-Dobo, pneumatic beneficiation, fluidized bed, separation, coal fraction, coal density, washability.

Введение

Обогащение угля превращает угольное сырье в товарный продукт, способный конкурировать на рынке органических энергоносителей с нефтью и газом. На сегодняшний день во всех индустриально развитых странах обогащению подвергается от 70 до 90% всех добываемых каменных углей, в частности, в ФРГ – 95%, в Великобритании – 75%, в США – 55%. Но мировыми лидерами в обогащении угля являются ЮАР и Австралия, где обогащается 100% экспортируемого угля.

Сухое обогащение угля представляет собой альтернативу снижению влажным методам, особенно актуальную в регионах с дефицитом водных ресурсов и суровыми климатическими условиями [1].

В работе [1] систематически рассмотрены перспективные исследовательские работы по сухому обогащению угля, описанные в литературе за последние 5 лет, и обсуждается прогресс в разработках сухого обогащения угля во всем мире.

Одним из непрерывно развивающихся способов обогащения углей является воздушная сепарация. Преимущества данного способа обусловлены возможностью значительного снижения материалоемкости, энергозатрат и уменьшения расхода технической воды. В настоящее время появились новые конструкции машин, характеризующиеся высокой эффективностью разделения в воздушном потоке приближающейся, а в ряде случаев превышающей показатели обогащения отсадкой или в тяжелых средах. Важным вопросом является проверка новых способов пневматического обогащения на различных типах угля [2-4].

Китайский университет горного дела и технологий провел многочисленные исследовательские работы по сухому обогащению угля за последние 30 лет и разработал ряд методов сухого обогащения для очистки угля, включая псевдоожиженный слой с пузырьками [5,6,7], псевдоожиженный слой с вибрацией [8].

По аналогии с Китаем, Индия сильно зависит от угля для удовлетворения своих энергетических потребностей в экономическом развитии [9]. Индийские ученые провели много исследовательских работ по использованию разделения в кипящем слое в плотной воздушной среде для очистки индийского угля [10,11,12] использовали сепаратор с псевдоожиженным слоем в плотной воздушной среде для обогащения индийского угля с высокой зольностью в диапазоне размеров 0,025- 6 мм и изучали стабильность псевдоожижения для создания расширяющегося слоя с условием нанопузырьков. Было отмечено, что стабильность псевдоожиженного слоя оказала значительное влияние на четкое разделение между чистым углем и пустой породой. Был создан непрерывный сепаратор с псевдоожиженным слоем в плотной воздушной среде с производительностью 600 кг/ч. Результаты разделения показывают, что содержание золы снижается с 40 % в исходном угле до примерно 32–35,5 % в чистом угольном продукте с выходом 60–72 %.

В процессе обогатимости крупных частицы (>5 мм) в пульсирующем воздушном потоке, показаны снижение зольности с 40% до 33% для фракционного состава от 5мм до 40мм. [13]. Разделение в псевдоожиженном слое магнетита фракций 0,1-5мм показали эффективность и хорошее соответствие теоретическим кривым обогатимости [14]. Также высокий результат обогатимости показали специализированные наземные столы (SIU Airtable). Обогатимости подверглись фракции 1-6мм, эффективность: отвод 49% золы при сохранении 89% горючей массы [15]. Обработка тонких фракций и разделение по различию электростатических свойств, показали эффективность: снижение зольности с 36% до 14,9% для групп –177 мкм. [16,17]. Конусные псевдоожиженные ступени с обогатимостью фракций 0,074-0,5 мм, также показали эффективность, в ре-

зультате идет снижение зольности с 31,82% до 12,33% при настройке углеконуса 10° [18]. Также известны обогатимость в классификационных колоннах размера частиц: <45 мкм, получены угли с зольностью <1% [19].

В целом, в процессе сухого обогащения угля наиболее значимыми свойствами угля,

способствующими разделению, являются плотность, фракция, трение, электричество и магнетит. В соответствии с различными механизмами обогащения, описанными в современной литературе, сухое обогащение угля в основном подразделяется на следующие пять категорий:

1-категория	разделение в кипящем слое с использованием плотной воздушной среды с внешним силовым полем или без него
2-категория	разделение в кипящем слое, основанное на разнице скоростей осаждения
3-категория	комбинированное сухое разделение
4-категория	трибоэлектростатическое разделение
5-категория	магнитное разделение

Эти пять категорий технологий имеют свои преимущества при переработке определенного угля или получении чистого угольного продукта определенного качества.

Технологии, относящиеся к категориям (1), (4) и (5), обычно характеризуются высокой эффективностью разделения, но высокими эксплуатационными расходами, что позволяет получать высококачественный чистый уголь. Напротив, технологии категорий (2) и (3) не требуют дополнительной плотной среды или энергии и обычно имеют большую производительность и низкую стоимость обработки, но низкую эффективность разделения из-за изначального ограничения механизма разделения. Эти технологии подходят для производства энергетического угля.

В условиях Кыргызстана особенно для угледобывающих предприятий расположенных на высокогорье, включая месторождение Кара-Добо Узгенского каменноугольного бассейна сухие технологии обогащения считаются особенно перспективными.

Актуальность исследования сухого обогащения угля месторождения Кара-Добо обусловлены тем, что уголь месторождения в основном ориентирован на экспорт; обогащение угля превращает угольное сырье в товарный продукт, способный конкурировать на рынке.

Целью исследований является сухое обогащение угля месторождения Кара-Добо методом сепарации и изучение влияния фракционного состава на обогатимость.

Метод исследования опирается на теоретические основы сепарации, направленный воздушный поток разделяет исследуемый уголь на фракции по плотности и определяются оптимальные условия разделения угля Кара-Добо и породных минералов в воздушных потоках.

Результаты исследования. Применение сухих методов предварительного обогащения рядовых углей на установках на базе пневматических сепараторов различного производства получает все более широкое применение на предприятиях обогащения. Использование метода вибропневматической сепарации позволяет создавать малогабаритные, компактные и мобильные обогатительные комплексы с круглогодичным циклом работы. При этом имеется возможность регулирования основных параметров процесса обогащения и автоматизированного управления.

Конструкция всех известных сепараторов основана на принципе пульсирующей подачи технологического воздуха под перфорированную деку. Бигармонический режим колебаний позволяет получать высокие технологические показатели и может применяться для выделения товарного продукта из углесодержащего сырья с широким диапазоном крупности и зольности [20-22].

Расслоение материала протекает в соответствии с законами гравитационного разделения частиц различных размеров и плотности в условиях стесненного их перемещения под воздействием воздушных по-

токов или сочетания воздушных потоков и механических встряхиваний, обеспечивающих разрыхление материала, необходимое для взаимного перемещения зерен. Результаты расслоения определяются влиянием этих воздействий, которые имеют одинаковую направленность по отношению к частицам разной крупности.

Под воздействием восходящих воздушных потоков частицы одинаковой крупности расслаиваются таким образом, что в нижних слоях концентрируются более тяжелые, а в верхних — более легкие; если частицы имеют одинаковую плотность, то в нижних слоях располагаются более крупные, а в верхних — более мелкие [20–22].

Элементы теории. Основные отличия воздушной среды от водной — более низкая плотность (1,23 и 1000 кг/м³ соответственно) и незначительная вязкость. Поэтому ускорение свободного падения твердого тела плотностью ρ_t в воздушной среде плотностью ρ_v приблизительно равно ускорению свободного падения g :

$$a = g(\rho_t - \rho_v) / \rho_t = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Конечную скорость падения tty (м/с) тела размером d (м), плотностью ρ_t (кг/м³) в воздушной среде определяют по формуле:

$$\vartheta_0 = \mu \sqrt{d(\rho_t - \rho_v) / \rho_v} = \mu \sqrt{d\rho_t / \rho_v}$$

где μ — коэффициент сопротивления, зависящий от формы и плотности частиц, равный 5—5,5 м^{1/2}/с.

Коэффициент равнопадаемости частиц в воздухе ниже коэффициента их равнопадаемости в водной среде. Например, при разде-

лении в воздушной среде угля плотностью 1200 кг/м³ и породы плотностью 2400 кг/м³ коэффициент равнопадаемости равен 2, в водной среде 7. Поэтому для обогащения в воздушной среде требуется более узкая шкала классификации. Однако на практике при обогащении углей в восходящем потоке воздуха наблюдается не свободное падение, а падение в стесненных условиях и скорости падения частиц никогда не достигают конечных скоростей; поэтому эффективное разделение углей и породы возможно и при более широкой шкале классификации, например, до 6 (13—75; 1—6 мм).

Важно также, что фактическое обогащение по более широкой шкале классификации обеспечивается мелкими частицами, поднятыми восходящим потоком воздуха, которые создают искусственную среду большей плотности, чем плотность воздуха.

Под воздействием механических встряхиваний частицы одинаковой крупности расслаиваются по плотности: внизу более тяжелые, вверху — более легкие. При одинаковой плотности частиц в нижних слоях концентрируются более мелкие, а в верхних — более крупные.

Нами была создана модель лабораторного сепаратора (рисунок 1), работа которой основана на принципе пульсирующей подачи технологического воздуха под перфорированную деку. Принцип работы такой модели позволяет изучить процесс расслоения угля по плотности.

Техническая характеристика такого сепаратора приведена в таблице 1.

Таблица 1. Техническая характеристика лабораторного сепаратора

№п/п	Наименование параметра и размерность	Величина
1.	Рабочая площадь разделения, см ²	500
2.	Ширина деки, см	10
3	Производительность по исходному, материалу, кг/ч,	10
4.	Крупность обогащаемого материала, мм	до 13
5.	Поверхностная влага материала, %	до 8
6.	Насыпная плотность материала, кг/м ³	до 2,5

7.	Погрешность разделения (при максимальной производительности)	0,25
8.	Диапазон регулируемой частоты качания деки, с-1	3,0-6,0
9.	Габаритные размеры, мм Длина Ширина высота	 5000 100 500
10.	Установленная мощность вентилятора, Вт, не более	100

Методика исследований.

В целях определения расслоения угля по плотности нами проведены серия опытов. Исследуемый уголь размером 0-13мм по-

дается в бункер1, затем поступает в деку 3, подача воздуха осуществляется через вентилятор 2, скорость воздуха регулируется. Под воздействием воздуха идет расслоение угля по плотности.

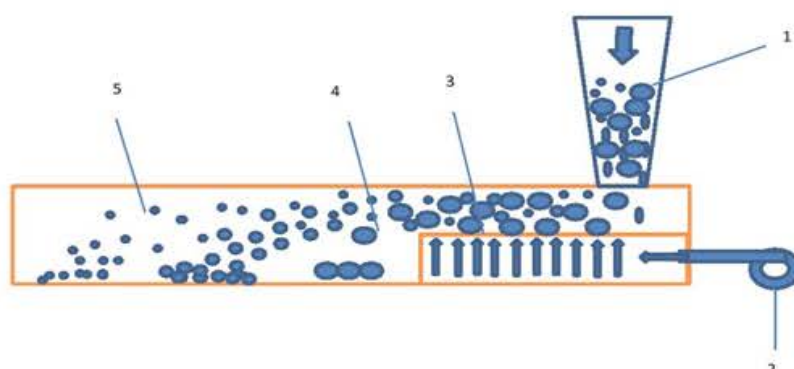


Рисунок 1. Сепаратор для изучения расслоения угля по плотности. 1-бункер для загрузки исследуемого угля; 2-воздуходувка; 3-дека; 4-расслоение угля по плотности; 5- расслоение

Исследованы принципы расслоения угля по плотности, фракционному составу, при различных потоках воздуха. Предварительные результаты показали, что расслоения угля по плотности на сортировочном

слое сильно зависит от размера частиц угля и потока воздуха, в нашем случае размеры частиц составили 0-6 мм, а поток воздуха составил 2, 4, 6 м/с. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расслоения угля по плотности на сортировочном слое.

№п/п	Размер частицы, мм	Длина слоя, м	Скорость потока воздуха м/с
1	0-0,25	2,1	2
2	0-0,25	3,0	4
3	0-0,25	4,3	6
4	0,25-1,0	0,8	2
5	0,25-1,0	1,3	4
6	0,25-1,0	1,8	6
7	1,0-3,0	0,5	2
8	1,0-3,0	0,8	4
9	1,0-3,0	0,9	6
10	3,0-6,0	0,1	2
11	3,0-6,0	0,3	4
12	3,0-6,0	0,4	6

Длина слоя частиц размером 0-0,25 мм при потоке воздуха 2м/с составил 2,1 м, а при 4 м/с составил 3,0м, при 6 м/с составил 4,3 м. Также выход частиц размером 0,25-1,0 мм при потоке воздуха 2м/с составил 0,8м, при 4 м/с составил 1,3м, при 6 м/с составил 1,8м.

Также установлено, что в зависимости от длины слоя, т.е. от изменения размера частицы угля улучшаются теплотехнические характеристики исследуемого угля. Наблюдается, что зольность частиц угля с наименьшим размером ниже по сравнению с крупными частицами угля. Смотрим таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость теплотехнических характеристики угля от изменения размера частицы исследуемого угля

№п/п	Размер частицы, мм	Зольность, %	Теплотворность Ккал/кг.
1	0-0,25	2,1	8100
4	0,25-1,0	4,5	7905
7	0-3,0	7,0	7670
10	0-6,0	13,2	7070

Как показано в таблице 3 угольные частицы размером 0-25мм с наименьшей плотности обладают наивысшим качеством по зольности и теплотворности.

Результаты этих исследований позволяют уточнить размеры и детали при конструировании сепаратора или других устройств сепарации угля, а также понять представление о расслоении угля по плотности в процессе сухого обогащения.

Выводы

1. Анализ работ по сухому обогащению углей показывает перспективность технологий и их применение вне зависимости от

климатических условий выделяет ключевые преимущества технологий сухого обогащения: экономика водных ресурсов; круглогодичная работа в условиях высокогорья; снижение капитальных и эксплуатационных затрат; экологическая безопасность.

2. Исследованы принципы расслоения угля месторождения Кара-Добопо плотности, фракционному составу, при различных потоках воздуха. Результаты показали, что расслоения угля по плотности на сортировочном слое сильно зависит от размера частиц угля и потока воздуха, в зависимости от длины слоя, т.е. от изменения размера

частицы угля улучшаются теплотехнические характеристики исследуемого угля.

3. Результаты этих исследований позволяют уточнить размеры и детали при

конструировании сепаратора или других устройств сепарации угля, а также понять представление о расслоении угля по плотности в процессе сухого обогащения.

Список литературы:

1. Y. Zhao, X. Yang, Z. Luo, C. Duan и S. Song, «Прогресс в развитии сухого обогащения угля», Международный журнал угольной науки и технологий, 2014. doi: [10.1007/S40789-014-0014-5](https://doi.org/10.1007/S40789-014-0014-5)
2. Дебердеев И.Х., Линев Б.И., Сазыкин Г.П. Повышение эффективности углеобогащательных фабрик в условиях изменчивости сырьевой базы // Обогащение руд. -2001. - №6. С. 67-71.
3. Люленков В.И., Кузьмин А.В., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Бойко Д.Ю. Способ сухого обогащения. Патент РФ №2268787, 2005. Опубл. 27.01.2006.
4. Кузьмин А.В., Люленков В.И., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Способ сухого обогащения угля. Патент РФ № 2282503, 2005. Опубл. 27.08.2006.
5. Ло Чжэньфу, ЧэньЦинжу. Технология сухого обогащения угля в кипящем слое плотной воздушной среды. Международный журнал по переработке полезных ископаемых. Том 63, выпуск 3, ноябрь 2001 г., страницы 167-175);
6. Чжэньфу, Л., Цинжу, Ч. и Яомин, З. (2002). Сухое обогащение крупного угля с использованием кипящего слоя в плотной воздушной среде (ADMFB). CoalPreparation, 22 (1), 57–64. <https://doi.org/10.1080/07349340210504> ;
7. Чжао Ю.М., Ли Г.М., Ло З.Ф., Лян Ц.К., Тан Л.Г., Чэнь Ц.Ц., Син Х.Б. (2011a) Модульная технология сухого обогащения угля на основе кипящего слоя газа и твердого вещества. Журнал технологий Южного университета, 18(2):374–380, [2011b](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.02.001)
8. Чжэньфу Лоа, Маомин Фань аб, Юэмин Чжао, Сюсян Тао, Цинжу Чен, Цзэнцян Чэнь. Разделение сухого мелкого угля в зависимости от плотности в вибрационном псевдоожиженном слое /<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.02.001>
9. Саху А.К., Трипати А., Бисвал С.К., Парида А. (2011) Исследование устойчивости сепаратора с кипящим слоем в плотной воздушной среде для обогащения высокозольного индийского угля. Int J CoalPrepUtili 31(3–4):127–148.)
10. Саху А.К., Бисвал С.К., Парида А. (2009) Разработка технологии кипящего слоя в плотной воздушной среде для сухого обогащения угля. Обзор. Int J CoalPrepUtili 29(4):216–241)
11. Саху А.К., Трипати А., Бисвал С.К., Парида А. (2011) Исследование устойчивости сепаратора с кипящим слоем в плотной воздушной среде для обогащения высокозольного индийского угля. Int J CoalPrepUtili 31(3–4):127–148),
12. Саху А.К., Трипати А., Бисвал С.К. (2013) Исследование динамики частиц в различных формах поперечного сечения сепаратора с псевдоожиженным слоем в плотной воздушной среде. Fuel 111:472–477.)
13. Т. ГуриЧаран, У. С. Чаттопадхай, К. М. П. Сингх, С. К. Кабирадж и Д. Д. Халдар, «Обогащение индийского угля с высоким содержанием золы, не коксующегося методом сухой отсадки», журнал «Minerals&MetallurgicalProcessingJournal», 2011. doi: [10.1007/BF03402320](https://doi.org/10.1007/BF03402320)
14. М. Фирдаус, Дж. П. О'Ши, Дж. Ошитани и Г. В. Фрэнкс, «Обогащение крупной угольной руды в сухом сепараторе с плотной средой и псевдоожиженным слоем», Международный журнал по подготовке и использованию угля, том 32, 2012. doi: [10.1080/19392699.2012.716801](https://doi.org/10.1080/19392699.2012.716801)
15. Х. Акбари, Л. А. Ака и М. К. Моханти, «Разработка нового сухого сепаратора для тонкодисперсных частиц», Minerals&MetallurgicalProcessing, 2018. doi: [10.19150/MMP.8289](https://doi.org/10.19150/MMP.8289)
16. С.О. Бада, Р. Фалькон и Л.М. Фалькон, «Потенциал электростатического разделения при обогащении мелкого южноафриканского угля перед его использованием – обзор», Журнал Южноафриканского института горного дела и металлургии, 2010 г.

17. Х. Бан, Т.-Х. Ли, Дж. Л. Шефер и Дж. М. Стенсель, «Характеристика сухого трибоэлектростатического обогащения угля и летучей золы с использованием анализа восстановления», 1996.
18. X. Fan, C. Zhou, L. Dong, C. Duan и Y. Zhao, «Обогащение угля с помощью конического псевдооживленного слоя с использованием магнетита с широким диапазоном размеров», 2020. doi: [10.1007/S42461-020-00195-9](https://doi.org/10.1007/S42461-020-00195-9)
19. З. Танака, Х. Сато, М. Каваи, К. Окада и Т. Такахаши, «Сухой процесс очистки угля для получения высококачественного угля», Журнал химического машиностроения Японии, т. 29, 1996. doi: [10.1252/JCEJ.29.257](https://doi.org/10.1252/JCEJ.29.257)
20. Ли Г.М. Методы сухого обогащения угля: практика применения / Г.М. Ли, В.А. Груздев, В.И. Аникин // Уголь. – 2008. - № 9. – С. 58-61.
21. Новая технология сухого обогащения // Российский уголь. – 2003. – №1. – С. 28-29.
22. Анохин В.Д. Вибрационные сепараторы / В.Д. Анохин, Д.А. Плинс, В.Н. Монахов.- М.: Недра, 1991. – 156 с