Оригинальная статья

УДК [662.613+62-665.4]:661.86

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: tikhonovvv@kuzstu.ru

Original Paper

UDC [662.613+62-665.4]:661.86

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: tikhonovvv@kuzstu.ru

Перспективы использования отходов углеобогащения для получения концентратов редких и редкоземельных элементов*

Prospects of using coal preparation waste to produce concentrates of rare and rare earth elements

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-30-33

ТИХОНОВ В.В.
Канд. техн. наук, директор Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: tikhonovvv@kuzstu.ru

ТИХОМИРОВА А.В.
Канд. хим. наук, доцент, доцент Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

ПИЛИН М.О.
Аспирант НХа-241, старший преподаватель Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

ГИНИЯТУЛЛИНА Ю.Р.
Канд. хим. наук, доцент Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: giniyatullinayur@kuzstu.ru

Комплексная переработка – важнейший принцип всех минерально-сырьевых отраслей промышленности, при этом отходы стоит рассматривать как техногенные месторождения. В отходах углеобогащения ЦОФ «Березовская» содержится до 4500 г/т титана, до 10 г/т скандия, до 150 г/т суммы редкоземельных элементов. В рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-1194 от 30 сентября 2022 г. создана опытная установка для наработки опытных партий концентратов оксидов редких и редкоземельных элементов и для наработки опытных партий оксидов скандия и титана (IV) и проведены экспериментальные испытания на ней. Особое внимание в статье уделено опытам по извлечению диоксида титана на созданной установке. Выявлено, что по принятому способу на данной установке можно достигнуть степени концентрирования титана от исходного содержания в сырье в девять раз.

Ключевые слова: *угольные отходы, опытная установка, редкие и редкоземельные элементы, диоксид титана, выщелачивание, рентгенофазовый анализ, фазовый состав.*
Для цитирования: Перспективы использования отходов углеобогащения для получения концентратов редких и редкоземельных элементов / В.В. Тихонов, А.В. Тихомирова, М.О. Пилин и др. // Уголь. 2025;(12):30-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-30-33.

Abstract
Comprehensive processing is the most important principle of all mineral and raw materials industries, while waste should be considered as technogenic deposits. The coal processing waste of the

** Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1194).*

Berezovskaya CCF contains up to 4500 g/t of titanium, up to 10 g/t of scandium, and up to 150 g/t of rare-earth elements. As part of the agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 075-15-2022-1194 dated September 30, 2022, a pilot plant was created for the production of pilot batches of rare and rare-earth element oxides and for the production of pilot batches of scandium and titanium (IV) oxides, and experimental tests were conducted on it. The article focuses on the extraction of titanium dioxide using the created plant. It has been found that the adopted method can achieve a concentration of titanium that is 9 times higher than the initial content in the raw material.

Keywords

Coal waste, pilot plant, rare and rare-earth elements, titanium dioxide, leaching.

Acknowledgements

The research was financially supported by a grant from the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2022-1194).

For citation

Tikhonov V.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Giniyatullina Yu.R. Prospects of using coal preparation waste to produce concentrates of rare and rare earth elements. *Ugol'*. 2025;(12): 30-33. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-30-33.

ВВЕДЕНИЕ

По некоторым данным, ежегодные объемы складируемых на территории Российской Федерации отходов обогащения углей, руд и минерального сырья составляют около 15 млн т. В настоящее время большинство углеобогатительных фабрик Кузбасса имеют устаревшее оборудование и технологии, в результате чего качество обогащения угля не соответствует ни международным стандартам, ни техническим отраслевым нормам. В итоге содержание угля в отходах обогащения колеблется в лучшем случае от 17 до 26%, но может достигать, в зависимости от марки угля, и 60%, что приводит к ежегодным потерям его в Кузбассе от 12 до 15 млн т. Уровень использования отходов угольной промышленности составляет примерно 50% от количества образующихся. Это приводит к развитию комплекса экологических проблем. Основным способом решения является включение отходов в производственный оборот, т.е. перевод отходов в категорию сырья и осуществление комплексной переработки угля [1].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Комплексная переработка – важнейший принцип всех минерально-сырьевых отраслей промышленности. В цветной металлургии комплексная переработка позволяет получать попутную продукцию, общая стоимость которой составляет около 30% товарного выпуска отрасли, извлекать около 70 элементов в виде 700 различных видов продукции. Из них на обогатительных фабриках выпускается 30 видов концентратов, являющихся попутной продукцией.

В то же время редкоземельные металлы (РЗМ) являются важными компонентами многих современных электронных устройств, сырьем для наукоемких отраслей промышленности. Использование РЗМ говорит об уровне инновационного развития конкретного производства. Однако их добыча или обогащение сложное и дорогостоящее занятие. С другой стороны, редкие и редкоземельные элементы станут незаменимыми в процессе перехода государств к более современным технологиям, в основе которых будут лежать био– и нанотехнологии, атомная и космическая промышленность, а также «зеленая энергетика». Именно поэтому такие элементы считаются стратегическими, их наличие в стране необходимо для обеспечения национальной безопасности [2].

В отходах углеобогащения ЦОФ «Березовская» содержится до 4500 г/т титана, до 10 г/т скандия, до 150 г/т суммы редкоземельных элементов.

В рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-1194 от 30 сентября 2022 г. создана опытная установка для наработки опытных партий концентратов оксидов редких и редкоземельных элементов и для наработки опытных партий оксидов скандия и титана (IV) и проведены экспериментальные испытания на ней.

Согласно выполненным исследованиям по разработке технологии извлечения редкоземельных элементов и индивидуальных элементов из отходов углеобогатительной фабрики ЦОФ «Березовская», была разработана технологическая схема.

Для отработки регламента была задана производительность по перерабатываемому сырью 100 кг разовой загрузки. Исходя из ранее полученных лабораторных данных, был рассчитан материальный баланс по технологической схеме.

Технология разделена на несколько основных технологических блоков:

1. Секция подготовки сырья к выщелачиванию.
2. Секция выщелачивания и сорбции.
3. Секция получения диоксида титана.

Секция № 1 предназначена для предварительной подготовки сырья к процессу выщелачивания, а именно: размельчения до прохождения сырья через сито, гранулирования и сульфатизирующего обжига гранул. В состав секции входят следующие блоки:

– дробильно-сортировочный блок;
– грануляционный блок.

Подбор оборудования выполнен исходя из производительности 100-150 кг в день по секции подготовки сырья к выщелачиванию. Работа отделения осуществляется в периодическом режиме.

Секция № 2 предназначена для осуществления технологической операции кучного выщелачивания и сорбции с целью извлечения концентратов редких и редкоземельных элементов и индивидуальных оксидов. В состав секции входят следующие блоки:

– блок кучного выщелачивания;
– блок получения алюминатного раствора;
– блок осаждения коллективного концентрата РЗМ и скандия.

Секция № 3 предназначена для осуществления технологических операций с целью получения диоксида титана. В состав секции входят следующие блоки:

– блок сульфатизации;

– блок выщелачивания;

– блок осаждения концентрата диоксида титана.

Опытная установка по извлечению опытных партий оксидов титана (IV), скандия и суммы оксидов редкоземельных элементов представлена на *рисунке*.

Опытная установка по извлечению опытных партий оксидов титана (IV), скандия и суммы оксидов редкоземельных элементов

Pilot unit for extraction of trial batches of titanium (IV) oxides, scandium oxides, and total oxides of rare earth elements

Остановимся подробнее на исследованиях по получению отдельного оксида – диоксида титана.

На опытной установке с сырьем (загрузка 20 кг) по принятой в ходе предыдущих исследований методике [3] производили экспериментальный опыт. Сырье имело следующий химический состав (*табл. 1*).

В ходе эксперимента производились следующие операции:

1. Смешение отходов агитационного выщелачивания (после извлечения редких и редкоземельных элементов в раствор) с серной кислотой концентрацией 92% (1:1).

2. Спекание смеси при температуре 260 ± 10 °С в течение двух часов.

3. Агитационное выщелачивание спека глубокообессоленной водой (1:4).

4. Центрифугирование суспензии.

Пробы отбирались из центрифуги. Результаты представлены в *табл. 2*.

Таким образом, степень извлечения титана в раствор – 76%. Далее, после добавления порошкообразного железа в раствор, он до pH3 20%-ным раствором аммиака подвергался кипячению в течение одного часа. Осадок отфильтровывался.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка концентрата диоксида титана, полученного на опытной установке, представлены в *табл. 3*.Таким образом, содержание титана в концентрате в пересчете на диоксид составляет 5,28%. Степень концентрирования – девять раз.

Определение элементного состава магнитной фракции отходов проведено на вакуумном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM» (производство ООО НПО «СПЕКТРОН» г. Санкт-Петербург) с напряжением на аноде рентгеновской трубки 40 кВт и мощностью рентгеновской трубки 160 Вт, предназначенном для определения содержаний химических элементов от Na до U в различных веществах.

Таблица 1

Результаты элементного анализа твердого остатка агитационного выщелачивания установки для извлечения редких и редкоземельных элементов

Results of elemental analysis of solid residue from agitation leaching in a unit for extracting rare and rare earth elements

Содержание	**Mg, %**	**Al, %**	**Si, %**	**S, %**	**K, %**	**Ca, %**	**Ti, %**	**V, %**	**–**
Остаток	0,55	9,76	19,85	0,05	4,73	0,93	0,36	0,009	–
Содержание	**Mn, %**	**Fe, %**	**Co, %**	**Ni, %**	**Cu, %**	**Zn, %**	**Sr, %**	**Ba, %**	**Pb, %**
Остаток	0,011	0,89	–	0,003	–	–	0,019	0,032	0,003

Таблица 2

Результаты элементного анализа продуктов переработки отхода агитационного выщелачивания с помощью серной кислоты 1:1

Results of elemental analysis of waste products from agitation leaching using 1:1 sulfuric acid

Содержание	**Mg, %**	**Al, %**	**Si, %**	**P, %**	**S, %**	**K, %**	**Ca, %**	**Ti, %**	**V, %**
Остаток	0,73	7,13	24,92	–	1,85	1,77	0,73	0,13	0,009
Фильтрат	2,75	5,69	0,36	–	73,76	1,83	2,07	0,42	0,003
Содержание	**Mn, %**	**Fe, %**	**Co, %**	**Ni, %**	**Zn, %**	**As, %**	**Sr, %**	**Ba, %**	**Pb, %**
Остаток	0,015	1,33	–	0,002	–	–	0,014	0,030	0,004
Фильтрат	0,135	3,56	0,001	0,006	0,026	–	0,009	–	0,003

Таблица 3

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка концентрата диоксида титана

Results of X-ray fluorescence analysis of the titanium dioxide concentrate sediment

Содержание	Mg, %	Al, %	Si, %	P, %	S, %	K, %	Ca,%	Ti, %	V, %
Концентрат	4,06	22,80	0,23	–	39,46	1,00	0,12	3,16	0,17
Содержание	**Cr, %**	**Mn, %**	**Fe, %**	**Ni, %**	**Zn, %**	**As, %**	**Sr, %**	**Ba, %**	**Pb, %**
Концентрат	0,001	0,107	21,29	0,003	0,003	0,005	–	–	–

Таблица 4

Фазовый состав концентрата оксида титана (IV)

Phase composition of the titanium (IV) oxide concentrate

№	Фаза	Содержание (масс, %)
1	Галотрихит ($FeAl_2[SO_4]_4 \cdot H_2O$)	21,69
2	Квасцы-(K) ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12(H_2O)$)	36,02
3	Пикромерит ($K_2Mg[SO_4]_2 \cdot 6H_2O$)	2,52
4	Брукит (TiO_2)	17,93
5	Титанит ($CaTiSiO_5$)	6,10
6	Вассонит (TiS)	3,05
7	Анатаз (TiO_2)	5,98
8	Оксид титана (IV) (TiO_2)	4,06
9	Рутил (TiO_2)	2,66

Как видно из результатов, содержание в концентрате практически поровну алюминия и железа, большое содержание серы, а также наличие относительно большого количества калия указывает на образование квасцов по возможным реакциям (ионы аммония и натрия рентгенофлуоресцентным методом не определяются):

$$Al_2(SO_4)_3 + (NH_4)_2SO_4 + 24H_2O \rightarrow 2NH_4Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O,$$

$$FeSO_4 + (NH_4)_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O,$$

$$Al_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 24H_2O \rightarrow 2KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O,$$

$$Al_2(SO_4)_3 + Na_2SO_4 + 24H_2O \rightarrow 2NaAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O.$$

В подтверждение вышесказанного был проведен рентгенофазовый анализ полученного концентрата (*табл. 4*). Рентгенофазовый анализ кека проведен на дифрактометре «Колибри» фирмы «Буревестник». Рентгенограммы снимались с шагом 0,02 в интервале 5-80 градусов, 2θ с вращением 60 об./мин и выдержкой 1,0 с в точке. Эксперимент выполнен при стандартных условиях с использованием CuKα-излучения. Напряжение на трубке – 40 кВт, ток – 30 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, перевод железа из трехвалентного состояния в двухвалентное не избавляет от наличия железа в концентрате. Кроме того, за счет образования квасцов снижается содержание диоксида титана в концентрате. Для уменьшения соотношения содержаний алюминия и железа в пользу последнего, то есть для увеличения степени концентрирования соединений титана необходимо добавление в раствор, например, щавелевой кислоты. Хотя при этом образуется малорастворимый оксалат железа (II), но происходит практически полное разложение квасцов с образованием оксалата алюминия, который растворим. Однако может произойти повышение содержания кальция в осадке, поскольку оксалат кальция также является нерастворимым. Работы на созданной опытной установке будут продолжены.

Список литературы • References

1. Щадов В.М. Переработка углей в России в XXI веке // Уголь. 2007. № 8. С. 28-31. URL: https://ugolinfo.ru/Free/082007.pdf (дата обращения: 15.11.2025).
   Schadov V.M. Processing coal in Russia in XXI century. *Ugol'.* 2007;(8):28-31. Available at: https://ugolinfo.ru/Free/082007.pdf (accessed 15.11.2025). (In Russ.).
2. Утилизация отходов добычи в переработке угля / В.Н. Фрянов, В.В. Севастьянов, А.Е. Родионов и др. Новокузнецк: СибГИУ, 2000. 55 с.
3. Тихомирова А.В., Пилин М.О., Черкасова Т.Г. Отходы углеобогащения – сырье для производства диоксида титана? // Уголь. 2024. № 11S. С. 38-41. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-38-41.
   Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Cherkasova T.G. Coal processing waste as a raw material for titanium dioxide production. *Ugol'.* 2024;(11S):38-41. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-38-41.

Authors Information

Tikhonov V.V. – PhD (Engineering), Director of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: tikhonovvv@kuzstu.ru

Tikhomirova A.V. – PhD (Chemical), Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

Pilin M.O. – Postgraduate Student of NHa-241, Senior Lecturer of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Giniyatullina Yu.R. – PhD (Chemical), Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: giniyatullinayur@kuzstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info

Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025