

Научная статья

УДК 546.824-31

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-61-69

ВЫДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА ТИТАНА ИЗ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ В РАМКАХ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ**Пилин Максим Олегович, Тихомирова Анастасия Владимировна,
Тихонов Виктор Владимирович, Черкасова Татьяна Григорьевна**

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: tav.htnv@kuzstu.ru

Аннотация.

Угольная промышленность на протяжении столетий остается ключевым элементом глобальной энергетической системы, обеспечивая более 35% мирового производства электроэнергии и оставаясь основным источником энергии для промышленности в странах с развивающейся экономикой. Современная промышленность сталкивается с растущими экологическими и ресурсными вызовами, связанными с увеличением объемов техногенных отходов. Одним из наиболее значимых источников таких отходов является углеобогащение – процесс, сопровождающийся образованием больших количеств хвостов, шламов и золошлаковых материалов. Потенциал отходов углеобогащения – источник альтернативного сырья, их исследование выявило присутствие титана в форме оксидов, силикатов и алюмотитанатов. Например, в золах Кузнецкого бассейна (Россия) концентрация TiO_2 достигает 8–12%, что сопоставимо с низкосортными рудами. Однако извлечение титана осложнено его дисперсным распределением и связью с матрицей алюмосиликатов.

В данной работе рассматриваются отходы углеобогащения ЦОФ «Березовская». В отходах данной обогатительной фабрики концентрация титана превышает промышленно значимые значения, характерные для угля, и близка к промышленно значимой для получаемой из него золы. Эта высокая концентрация делает извлечение титана из этих отходов не только перспективной, но и экономически привлекательной задачей, особенно в контексте комплексной переработки. Фактически речь идет о переходе от проблемы утилизации отходов к созданию нового, высокорентабельного производства. Как видно из Таблицы 2, содержание соединений титана коррелируется с содержанием железа, следовательно, теоретически для извлечения титана можно использовать способы переработки ильменитовых руд. Титан предложено извлекать из отходов перколяционного выщелачивания, образованных в ходе комплексной переработки отходов углеобогащения с извлечением ценных компонентов. Титан представлен в отходе в виде оксидных форм. Проведены лабораторные исследования, доказывающие эффективность технологии извлечения титана в виде диоксида. Степень извлечения титана по технологии переработки, состоящей из стадий сульфатизирующего обжига, холодного выщелачивания с последующим кипячением раствора и фильтрованием, достигает 99,5%. Содержание диоксида титана в концентрате составляет 7,32%. Высокое содержание элементов помимо титана говорит о присутствии в осадке растворимых двойных сульфатов железа,

**Информация о статье**

Поступила:

22 ноября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 января 2025 г.

Принята к публикации:

30 января 2025 г.

Опубликована:

12 марта 2025 г.

Ключевые слова:отходы производства,
техногенное сырье,
переработка отходов,
комплексная переработка,
диоксид титана, концентрат

алюминия и калия. Это свидетельствует о том, что необходимо отработать режимы фильтрования.

Для цитирования: Пилин М.О., Тихомирова А.В., Тихонов В.В., Черкасова Т.Г. Выделение диоксида титана из отходов углеобогащения в рамках комплексной переработки техногенного сырья // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 1 (167). С. 61-69. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-61-69, EDN: ISQAZB

Введение

Угольная промышленность на протяжении столетий остается ключевым элементом глобальной энергетической системы, обеспечивая более 35% мирового производства электроэнергии и оставаясь основным источником энергии для промышленности в странах с развивающейся экономикой, таких как Китай, Индия и Южная Африка [1]. Однако добыча и переработка угля сопровождаются образованием огромного количества отходов, которые накапливаются в виде терриконов, шламовых отстойников и золошлаковых материалов. По оценкам Всемирного угольной ассоциации (World Coal Association), ежегодно в мире образуется более 1 млрд тонн угольных отходов, из которых перерабатывается менее 15%. Эти отходы содержат токсичные вещества, включая тяжелые металлы (мышьяк, свинец, ртуть), радиоактивные элементы и кислотные дренажные воды, что приводит к масштабному загрязнению почв, водоемов и атмосферы.

Современная промышленность сталкивается с растущими экологическими и ресурсными вызовами, связанными с увеличением объемов техногенных отходов. Одним из наиболее значимых источников таких отходов является углеобогащение — процесс, сопровождающийся образованием больших количеств хвостов, шламов и золошлаковых материалов. По данным Международного энергетического агентства, ежегодно в мире производится свыше 1 млрд тонн отходов углепереработки, которые преимущественно складываются в отвалах, занимая обширные территории и загрязняя окружающую среду тяжелыми металлами, радионуклидами и токсичными соединениями. Накопление этих материалов создает риски для экосистем и здоровья человека, включая загрязнение грунтовых вод и эмиссию пыли [2].

Одновременно с экологическими рисками угольные отходы представляют собой недооцененный ресурсный потенциал. Современные исследования подтверждают, что в их составе могут содержаться ценные компоненты: редкоземельные элементы (РЗЭ), такие как неодим, иттрий и скандий, концентрации которых в некоторых угольных золах достигают 500–1000 ppm; металлы (алюминий, железо, титан), а также сырье для строительной индустрии (силикаты, глинозем) [3]. Например, в отходах Кузнецкого бассейна

(Россия) содержание алюминия превышает 20%, что сопоставимо с бокситовыми рудами. Извлечение этих компонентов могло бы не только снизить нагрузку на экосистемы, но и сократить зависимость от традиционных источников сырья, таких как редкоземельные рудники Китая или бокситовые месторождения Австралии.

Потенциал отходов углеобогащения — источник альтернативного сырья, их исследование выявило присутствие титана в форме оксидов, силикатов и алюмотитанатов. Например, в золах Кузнецкого бассейна (Россия) концентрация TiO_2 достигает 8–12%, что сопоставимо с низкосортными рудами. Однако извлечение титана осложнено его дисперсным распределением и связью с матрицей алюмосиликатов [4].

Углеобогатительные отходы, содержащие ценные металлы, такие как титан, могут стать альтернативным источником сырья, сократив потребность в добыче руд и минимизировав экологический ущерб.

Титан относится к критически важным металлам благодаря уникальным свойствам: высокой коррозионной стойкости, прочности при малом весе и биосовместимости. Он широко применяется в аэрокосмической, медицинской, химической и энергетической отраслях [5]. Однако традиционное производство титана из ильменита ($FeTiO_2$) и рутила (TiO_2) сопряжено с высокими энергозатратами и выбросами CO_2 . Например, процесс Кролла, используемый для получения металлического титана, требует температуры выше $1000^\circ C$ и генерации токсичных побочных продуктов [6].

Растущий спрос на титан (прогнозируемый рост рынка на 5% ежегодно до 2030 года) и ограниченность природных месторождений делают актуальным поиск альтернативных источников. Углеобогатительные отходы, содержащие до 10% TiO_2 в составе золы, представляют значительный интерес [7].

В литературных источниках описывается два основных метода выделения оксида титана из титановых руд — это сульфатный и хлоридный методы. Сульфатный метод включает в себя обработку титаносодержащих руд серной кислотой. В результате образуется сульфат титана, который затем перерабатывается в оксид титана через стадии осаждения, промывки и обжига. Данный процесс широко применяется в

промышленности, однако он требует значительных затрат на сырье и энергию. Хлоридный метод обработки титаноносной руды представляет собой обработку хлором, что позволяет получить хлорид титана. После этого хлорид подвергается высокотемпературной обработке с использованием водорода для получения оксида титана. Хлоридный процесс является более эффективным и экологически чистым по сравнению с сульфатным. Он часто используется для производства высококачественного пигмента.

Важно понимать, что высокая концентрация титана в отходах углеобогащения обусловлена геологическими особенностями месторождения угля, из которого они получены. Вероятно, присутствие титаносодержащих минералов, таких как ильменит, рутил или титаномагнетит, в исходной угленосной породе обуславливает их высокое содержание в отвалах. Эти минералы не всегда удается полностью отделить от угля в процессе обогащения, что и приводит к накоплению титана в отходах. Разработка эффективной технологии переработки отходов

Таблица 1. Выявленные интервалы содержаний редких и редкоземельных элементов в отходах углеобогащения ЦОФ «Березовская» а также оценка возможной промышленной значимости [8, 9], г/т

Table 1. The revealed ranges of the contents of rare and rare-earth elements in the carbon enrichment waste of the Berezovskaya Central Processing Plant, as well as an assessment of possible industrial significance [8, 9], g/t

Элемент	Интервалы содержаний, г/т		Минимальное возможное промышленно значимое, г/т	
	в отходах обогащения партия 1	в отходах обогащения партия 2	для угля	для золы угля
Sc	6,7-12,3	6,4-7,6	10	50
Cr	17,7-50	10,5-12,5	-	7000
Ti	2864-3893	3137-4219	1500	7500
Co	6,7-11,4	8,6-10,2	20	100
Zn	9,1-45	70-83	400	2000
Rb	46-97	108-138	-	175
Sr	127-455	168-370	400	2000
Sb	0,48-4	1,12-2,10	30	150
Cs	3,5-6,3	7,3-8,8	-	150
Ba	113-875	520-949	5	-
Y	11,6- 27,0	27-42	15	75
Zr	89- 176	223-240	120	600
Nb	4,0- 12,2	10,0-13,5	10	50
Au	0,02-0,1	0,10-1,03	0,02	0,1
Ag	<0,1	0,15- 1,90	1	5
Pt	0,068-0,075	0,046-0,076	0,005	0,025
Pd	0,39-0,62	0,012-0,017	0,005	0,025
Sn	0,65- 137	1,6-2,3	20	100
Se	0,86- 2,3	1,5- 2,6	1	5

Таблица 2. Содержание матричных элементов в образцах отходов ЦОФ «Березовская» в пересчете на оксиды

Table 2. The content of matrix elements in samples of waste from the Berezovskaya Central Research Institute in terms of oxides

Оксид/ номер образца	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
	X, %								
1.1	45,5	13,2	5,0	0,05	1,08	2,44	2,41	0,53	0,11
1.2	40,4	11,5	6,2	0,06	1,06	3	2,04	0,49	0,16
1.3	< 20,0	4,7	7,3	0,09	2,39	9,1	1	0,22	0,17
1.4	42,8	12,5	12,6	0,13	1,61	2,11	3,6	0,61	0,1
1.5	52,5	14,8	6,3	0,08	1,34	1,38	4,6	0,62	0,13
2.1	45,7	13,1	4,7	0,043	1,6	4,5	2,1	0,50	0,09
2.2	58,1	18,4	3,7	0,048	1,5	1,25	2,5	0,74	0,11
2.3	55,1	18,3	3,6	0,041	1,5	1,4	2,5	0,74	0,11

Таблица 3. Фазовый состав кека после выщелачивания соединений редких и редкоземельных элементов

Table 3. Phase composition of the residue after leaching of compounds of rare and rare-earth elements

№	Фаза	Содержание (масс, %)
1	Albite ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)	33,35
2	Quartz (SiO_2)	30,58
3	Anorthite ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$)	17,78
4	Brookite (TiO_2)	8,43
5	Hematite (Fe_2O_3)	5,10
6	Titanium Oxide (TiO_2)	1,91
7	Anatase (TiO_2)	1,86
8	Kaolinite ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$)	0,99

Таблица 4. Результаты элементного анализа продуктов переработки отхода углеобогащения с помощью сульфата аммония

Table 4. The results of the elemental analysis of carbon enrichment waste products using ammonium sulfate

	Mg, %	Al, %	Si, %	S, %	K, %	Ca, %	Ti, %	V, %	
Остаток	0,74	6,81	27,43	0,95	1,52	0,33	0,38	0,009	
Фильтрат	2,35	8,01	0,03	69,00	3,88	2,66	0,002	–	
	Mn, %	Fe, %	Co, %	Ni, %	Cu, %	Zn, %	Sr, %	Ba, %	Pb, %
Остаток	0,012	1,70	–	0,003	0,002	–	0,01	0,03	0,006
Фильтрат	0,16	0,77	0,001	0,005	–	0,03	0,03	–	0,003

ЦОФ «Березовская» обеспечит не только утилизацию отходов, но и производство востребованной продукции, что положительно скажется на экологической ситуации и экономике региона. Дальнейшие исследования в этом направлении, несомненно, приведут к созданию рентабельного производства титана из угольных отходов.

Методы и результаты

В данной работе рассматриваются отходы углеобогащения ЦОФ «Березовская». Результаты элементного анализа состава отходов представлены в Таблицах 1-2.

Отходы углеобогащения Березовской ЦОФ, представляющие собой шламы, содержат значительное количество титана. Концентрация титана превышает промышленно значимые значения, характерные для угля, и близка к промышленно значимой для получаемой из него золы. Эта высокая концентрация делает извлечение титана из этих отходов не только перспективной, но и экономически привлекательной задачей, особенно в контексте комплексной переработки. Фактически речь идет о переходе от проблемы утилизации отходов к созданию нового, высокорентабельного производства. Как видно из Таблицы 2, содержание соединений титана коррелируется с содержанием железа, следовательно, теоретически для извлечения титана можно использовать способы переработки ильменитовых руд. Тем не менее, согласно данным по проведенной с названными отходами

магнитной сепарации [10-12] титан извлекается из них не в полной мере, в связи с этим проводить предварительное обогащение отходов до извлечения соединений титана или извлекать из отходов титаносодержащий концентрат до химической переработки нецелесообразно.

В рамках комплексной переработки отходов углеобогащения с выделением соединений редких и редкоземельных элементов изначально принято, что соединения титана после операций по гранулированию отхода и сульфатизирующему обжигу переходят в раствор. Однако в ходе дополнительных исследований выявлено, что по большей части соединения титана после холодного выщелачивания остаются в твердом остатке гранул – кремнийсодержащем кеке.

Рентгенофазовый анализ кека проведен на дифрактометре «Колибри», фирмы «Буревестник». Рентгенограммы снимались с шагом 0,02 в интервале 5...80 град. 2θ с вращением 60 об/мин и выдержкой 1,0 сек. в точке. Эксперимент выполнен при стандартных условиях с использованием $\text{CuK}\alpha$ – излучения. Напряжение на трубке 40 кВт., ток 30 мА. Фазовый состав кека после выщелачивания соединений редких и редкоземельных элементов представлен в Таблице 3.

Как видно из полученных данных, титан представлен в образце кека в виде оксидных форм. Возможно, это связано с тем, что предшествующий выщелачиванию сульфатизирующий обжиг смеси отходов

углеобогащения проводился при температуре порядка 400 °С с разложением серосодержащих соединений, которые не перешли в раствор при холодном выщелачивании [13, 14].

Проведен ряд испытаний по переводу соединений титана в раствор по технологии переработки илименитовых руд [15]. Сульфатизацию проводили сульфатом аммония, который смешивали с концентратом в массовом отношении сырье : сульфат аммония, равном 1:(3...4), полученный продукт со скоростью 2,5 град/мин нагревали до температуры прокаливания 900°С и выдерживали при достигнутой температуре в течение 5,0...5,5 часов, после чего осуществляли обработку прокаленного продукта раствором серной кислоты с концентрацией 20...25 г/л с переводом железа в растворимую форму и получением осадка диоксида титана, который отфильтровывали и промыли водой. Однако данный метод согласно рентгенофлуоресцентному анализу не дал положительных результатов, поскольку после совершения всех манипуляций титан не перешел в раствор и остался в отходе (Таблица 4).

Согласно ранее проведенным опытам диоксид титана предложено выделять из отходов двумя способами:

Сернокислотное вскрытие титаносодержащего сырья и последующее холодное выщелачивание водой в соотношении Ж:Т = 1:10 и фильтрование с последующим кипячением;

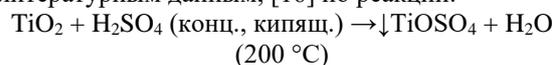
Сернокислотное вскрытие титаносодержащего сырья и последующее горячее выщелачивание водой в соотношении Ж:Т = 1:2 и горячее фильтрование с отмывкой горячей водой, кристаллизацией примесей, повторным фильтрованием и последующим добавлением в фильтрат сульфата либо гидроксида аммония.

Исходя из исследований, проводимых с различными отходами, в лабораторных условиях лучший результат дает второй способ, так как при этом происходит четырехкратное концентрирование титана от исходного материала.

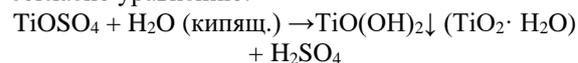
Однако технологически такой способ трудноосуществим, так как сернокислотное вскрытие титаносодержащего кека должно проводиться в избытке серной кислоты (иначе инертные соединения титана не будут взаимодействовать и останутся в сырье). Последующее нагревание в присутствии концентрированной серной кислоты

отрицательно скажется на состоянии оборудования. Кроме того, в случае второго способа необходимо постоянное поддержание температуры на стадии горячего выщелачивания и фильтрования (включая обогрев трубопроводов), так как в случае охлаждения даже до 50°С из раствора начинают кристаллизоваться примеси – двойные сульфаты щелочных и щелочноземельных металлов и алюминия, что затрудняет эксплуатацию установки и дальнейшее извлечение концентрата.

При сопоставимых концентрациях титана, щелочных и щелочноземельных металлов в отходе при сульфатизации возможна реакция образования двойных сульфатов титана с последующим выделением его в раствор в виде оксосульфата титана (IV). Либо, минуя образование двойных сульфатов, диоксид титана взаимодействует с серной кислотой, согласно литературным данным, [16] по реакции:



Выделение соединений титана из растворов после холодного выщелачивания осуществляется согласно уравнению:



Реакция протекает при кипячении фильтрата в течение 2 ч., pH раствора 1,5...3 (кислотность среды необходимо поддерживать добавлением раствора аммиака, так как в процессе реакции выделяется серная кислота). В этом интервале pH возможно выделение соединений железа (III). Между тем, если находящийся в растворе сульфат железа (II) может быть в значительной мере удален из него при охлаждении вследствие кристаллизации в виде железного купороса, то сульфат железа (III) удалить таким путем из раствора невозможно. В связи с этим находящийся в растворе после выщелачивания сульфат железа (III) восстанавливают до сульфата железа (II) с использованием в качестве восстановителя металлического железа.

Для восстановления иона железа (III) в емкость с раствором после выщелачивания вводят железо с сильно развитой поверхностью – в виде порошка. Количество железа, необходимого для восстановления, зависит от содержания железа (III) в растворе. Восстановление продолжается 2 ч, для ускорения процесса раствор нагревают и перемешивают. Степень извлечения титана из фильтрата в этом

Таблица 5. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка концентрата диоксида титана (в пересчете на оксиды)

Table 5. Results of X-ray fluorescence analysis of titanium dioxide concentrate precipitate (in terms of oxides)

Концентрат	SO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Массовая доля, %	35,82	20,24	2,45	7,00	7,32	26,48

случае достигает 99,5%.

В концентрате, повторно полученном по принятой методике, но из кека выщелачивания, содержание титана в пересчете на диоксид составляет 7,32% (Таблица 5).

Высокое содержание элементов помимо титана говорит о присутствии в осадке растворимых двойных сульфатов железа, алюминия и калия. Это свидетельствует о том, что необходимо отработать режимы фильтрования.

Исходя из вышеописанного, принято решение выделять концентрат, содержащий диоксид титана из растворов после холодного выщелачивания с последующим кипячением, отстаиванием и фильтрованием, так как эта схема представляется наименее технологически сложной.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA. Coal 2022: Analysis and forecast to 2025.
2. Blissett R. S., Smalley, N. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content // *Fuel*. 2012. 119. Pp. 236-239.
3. Seredin V. V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // *International Journal of Coal Geology*. 2012. 94. Pp. 67–93.
4. Wang T. [et al.] Titanium extraction from titaniferous magnetite: A review // *Minerals Engineering*. 2019. 131. Pp. 130-143.
5. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023 : Titanium. Reston, VA : USGS 2023.
6. Gupta C. K., Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of titanium // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005. 26(1). Pp. 1-31.
7. Zhang Y., Hu Y. Recovery of metals from coal fly ash: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. 157. 104753.
8. ИТС 24-2020 Производство редких и редкоземельных металлов. М. : Бюро НДТ, 2020. 338с.
9. Алексейко Л. Н., Таскин А. В., Черепанов А. А., Юдаков А. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ гг. Хабаровск и Биробиджан // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2016. № 1 (17). С. 22–34.
10. Черкасова Т. Г., Пилин М. О., Тихомирова А. В., Белов Р. А. Влияние гранулометрического состава на магнитные свойства отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» // *Уголь*. 2024. № 7. С. 38–41.
11. Черкасова Т. Г., Пилин М. О., Тихомирова А. В. Исследование магнитных свойств отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» // *Уголь*. 2024. № 6. 40–44.
12. Черкасова Т. Г., Пилин М. О., Тихомирова А. В. Исследование магнитной сепарации как этапа комплексной переработки отходов углеобогащения // *Уголь*. 2024 №11S. С. 25–32.
13. Зеленская Е. В., Тихомирова А. В., Пилин М.О . Получение диоксида титана при переработке отходов углеобогащения // I Международная VII Всероссийская конференция «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». г. Кемерово. 2024.
14. Тихомирова А. В., Пилин М. О., Черкасова Т. Г. Отходы углеобогащения – сырье для производства диоксида титана? // *Уголь*. 2024; №11S. С. 38–41.
15. Патент N 2 715 192 Российская Федерация, МПК C01G 23/053 (2006.01) C22B 34/12 (2006.01) C22B 1/06 (2006.01) C22B 3/08 (2006.01) C01G 49/14 (2006.01) C01C 1/242 (2006.01). Способ переработки ильменитового концентрата: N 2019104793: заявл. 20.02.2019;опубл. 25.02.2020 / Медков М. А., Крысенко Г. Ф., Эпов Д. Г. 6 с.
16. Лучинский Г. П. Химия титана. Изд-во «Химия», 1971. 472 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пилин Максим Олегович – аспирант гр.НХа-241, старший преподаватель кафедры Технология пластмасс, органического/ синтеза и нефтехимии Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Тихомирова Анастасия Владимировна – к.х.н., доцент, доцент кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов 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

Тихонов Виктор Владимирович – к.т.н., доцент кафедры Энергоресурсосберегающих процессов химических и нефтегазовых технологий, Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово,

Россия, e-mail: tikhonovvv@kuzstu.ru

Черкасова Татьяна Григорьевна – д.х.н., профессор, профессор кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Пилин Максим Олегович - обзор соответствующей литературы, выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, выводы, написание текста;

Тихомирова Анастасия Владимировна – обзор соответствующей литературы, выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, выводы, написание текста;

Тихонов Виктор Владимирович – сбор и анализ данных, оформление работы, выводы, написание текста

Черкасова Татьяна Григорьевна – сбор и анализ данных, оформление работы, выводы, написание текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ISOLATION OF TITANIUM DIOXIDE FROM COAL ENRICHMENT WASTE IN THE FRAMEWORK OF COMPLEX PROCESSING OF MAN-MADE RAW MATERIALS

**Maxim O. Pilin, Anastasia V. Tikhomirova,
Viktor V. Tikhonov, Tatiana G. Cherkasova**

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: tav.htnv@kuzstu.ru



Article info

Received:

22 November 2024

Accepted for publication:

22 January 2025

Accepted:

30 January 2025

Published:

12 March 2025

Keywords: industrial waste, man-made raw materials, waste recycling, complex processing, titanium dioxide, concentrate

Abstract.

The coal industry has remained a key element of the global energy system for centuries, providing more than 35% of global electricity production and remaining the main source of energy for industry in emerging economies. Modern industry is facing growing environmental and resource challenges associated with an increase in the volume of man-made waste. One of the most significant sources of such waste is coal enrichment, a process involving the formation of large amounts of tailings, sludge, and ash and slag materials. The potential of coal enrichment waste as a source of alternative raw materials, the study of which revealed the presence of titanium in the form of oxides, silicates and aluminotitanates. For example, in the ashes of the Kuznetsk basin (Russia), the concentration of TiO₂ reaches 8-12%, which is comparable to low-grade ores. However, the extraction of titanium is complicated by its dispersed distribution and binding to the aluminosilicate matrix. In this paper, the waste of coal enrichment of the Berezovskaya Central Processing Plant is considered. In the waste of this processing plant, the concentration of titanium exceeds the industrially significant values characteristic of coal, and is close to the industrially significant for the ash obtained from it. This high concentration makes the extraction of titanium from these wastes not only promising, but also economically attractive, especially in the context of integrated processing. In fact, we are talking about the transition from the problem of waste disposal to the creation of a new, highly profitable production. As can be seen from Table 2, the content of titanium compounds correlates with the iron content, therefore, theoretically, methods of processing ilmenite ores can be used to extract titanium. It is proposed to extract titanium from percolation leaching waste formed during the complex processing of carbon enrichment waste with the extraction of valuable components. Titanium is represented in the waste in the form of oxide forms. Laboratory studies have been conducted to prove the effectiveness of titanium dioxide extraction technology. The degree of

titanium extraction by processing technology, consisting of the stages of sulfatizing roasting, cold leaching, followed by boiling the solution and filtration, reaches 99.5%. The titanium dioxide content in the concentrate is 7.32%. The high content of elements other than titanium indicates the presence of soluble double sulfates of iron, aluminum and potassium in the sediment. This indicates that it is necessary to work out the filtering modes.

For citation: Pilin M.O., Tikhomirova A.V., Tikhonov V.V., Cherkasova T.G. Isolation of titanium dioxide from coal enrichment waste in the framework of complex processing of man-made raw materials. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 7(167):61-69. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-61-69, EDN: ISQAZB

REFERENCES

1. IEA. Coal 2022: Analysis and forecast to 2025.
2. Blisset R.S., Smalley N. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content. *Fuel*. 2012; 119:236-239.
3. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*. 2012; 94:67-93.
4. Wang T., [et al.] Titanium extraction from titaniferous magnetite: A review. *Minerals Engineering*. 2019; 131:130-143.
5. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023: Titanium. Reston, VA: USGS 2023
6. Gupta C.K., Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of titanium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005; 26(1):1-31.
7. Zhang Y., Hu Y. Recovery of metals from coal fly ash: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 157:104753.
8. ITS 24-2020 Proizvodstvo redkih i redkozemel'nykh metallov. M.: Byuro NDT; 2020. 338 s.
9. Aleksejko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A., Yudakov A.A. Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovykh othodov TEC gg. Habarovsk i Birobidzhan. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*. 2016; 1(17):22-34.
10. Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V., Belov R.A. Vliyanie granulometricheskogo sostava na magnitnye svoystva othodov ugleobogashcheniya AO COF «Berezovskaya». *Ugol'*. 2024; 7:38-41.
11. Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V. Issledovanie magnitnykh svoystv othodov ugleobogashcheniya AO COF «Berezovskaya». *Ugol'*. 2024; 6:40-44.
12. Cherkasova T.G., Pilin M.O., Tikhomirova A.V. Issledovanie magnitnoj separacii kak etapa kompleksnoj pererabotki othodov ugleobogashcheniya. *Ugol'*. 2024; 11S:25-32.
13. Zelenskaya E.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O. Poluchenie dioksida titana pri pererabotke othodov ugleobogashcheniya. *I Mezhdunarodnaya VII Vserossiyskaya konferenciya «Himiya i himicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy»*. g. Kemerovo. 2024.
14. Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Cherkasova T.G. Othody ugleobogashcheniya – syr'e dlya proizvodstva dioksida titana? *Ugol'*. 2024; 11S:38-41.
15. Patent N 2 715 192 Rossiyskaya Federaciya, MPK C01G 23/053 (2006.01) C22B 34/12 (2006.01) C22B 1/06 (2006.01) C22B 3/08 (2006.01) C01G 49/14 (2006.01) C01C 1/242 (2006.01). Sposob pererabotki il'menitovogo koncentrata: N 2019104793: zayavl. 20.02.2019:opubl. 25.02.2020 / Medkov M.A., Krysenko G.F., Epov D.G. 6 s.
16. Luchinskij G.P. Himiya titana. Izd-vo «Himiya», 1971. 472 s.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Maxim O. Pilin, senior lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: pilinmo@kuzstu.ru

Anastasia V. Tikhomirova, C. Sc. in Chemistry, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: tav.htnv@kuzstu.ru

Viktor V. Tikhonov, C. Sc. In Technical, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: : tikhonovvv@kuzstu.ru

Tatiana G. Cherkasova, Dr. Sc. in Chemistry, Professor, Director of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Maxim O. Pilin - review of relevant literature, performing experiments, collecting and analyzing data, drawing conclusions, writing text;

Anastasia V. Tikhomirova– review of relevant literature, performing experiments, collecting and analyzing data, drawing conclusions, writing text;

Viktor V.Tikhonov – data collection and analysis, paper design, conclusions, writing text;

Tatiana G. Cherkasova – data collection and analysis, paper design, conclusions, writing text.

All authors have read and approved the final manuscript.

