

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

DOI 10.51885/1561-4212_2024_2_105
MPHTI 53.31.01

С.Б. Юлусов¹, О.С. Байгенженов², А.Т. Хабиев³, Е.С. Меркибаев⁴

Satbayev university, г. Алматы, Казахстан

¹E-mail: s1981b@mail.ru

²E-mail: o.baigenzhenov@satbayev.university*

³E-mail: alibek1324@mail.ru

⁴E-mail: y.merkibayev@satbayev.university

ОБЗОР МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

ҚҰРАМЫНДА ВАНАДИЙ БАР ТЕХНОГЕНДІК ШИКІЗАТТЫ ЕҢДЕУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

REVIEW OF METHODS FOR PROCESSING TECHNOGENIC VANADIUM-CONTAINING RAW MATERIALS

Аннотация. В статье рассмотрены методы переработки техногенного ванадийсодержащего сырья, включая методы предварительного спекания и выщелачивания сырья, экстракции и осаждения ванадийсодержащих растворов. Кроме того, приведены конкретные методы, используемые для каждого вида техногенного ванадийсодержащего сырья, с описанием их преимуществ и ограничений, а также кратко проанализированы ряд основных влияющих факторов и механизмов различных процессов. Предлагаются некоторые перспективные исследования для улучшения методов концентрирования ванадия из техногенного ванадийсодержащего сырья.

В статье рассматривается потенциал переработки отработанных ванадиевых катализаторов, используемых в нефтехимических процессах, которые могут быть потенциальным источником для извлечения ванадия. Кроме того, ванадийсодержащее бокситовое сырье, нефть и шлаки сталелитейного производства могут быть перспективным сырьем для дальнейшего извлечения ванадия.

Ключевые слова: ванадийсодержащее сырье, отработанные ванадиевые катализаторы, остатки бокситов, нефтяные остатки, выщелачивание.

Аңдатпа. Мақалада құрамында ванадий бар шикізатты қайта еңдеу әдістері, оның ішінде шикізатты алдын ала күйдіру және шаймалау арқылы құрамында ванадий бар ерітінділерді алу және тұндыру әдістері қарастырылған. Сонымен қатар, құрамында ванадий бар әртүрлі техногендік шикізаттардың артықшылықтары мен кемшіліктері сипатталып, қолданылатын процестердің бірқатар негізгі әсер етуші факторлары мен механизмдері талданған. Құрамында ванадий бар техногендік шикізаттан ванадийді шоғырландыру әдістерін жақсарту үшін кейбір зерттеу перспективалары ұсынылады.

Мақалада ванадийді алудың өлеуетті шикізат кезі болуы мүмкін мұнай-химия процестерінде қолданылатын қалдық ванадий катализаторларын, боксит шикізатын, мұнайды және болат өндірісінің шлактарын қайта еңдеу мүмкіншіліктері қарастырылған.

Түйін сөздер: құрамында ванадий бар шикізат, пайдаланылған ванадий катализаторлары, боксит қалдықтары, мұнай қалдықтары, шаймалау.

Abstract. The article discusses the methods of processing technogenic vanadium-containing raw materials, including methods of pre-sintering and leaching of raw materials, extraction and precipitation of vanadium-containing solutions. In addition, the specific methods used for each type of technogenic vanadium-containing raw materials are described, with a description of their advantages and limitations. The article also briefly analyzes a number of the main influencing factors and mechanisms of various

processes. Some research prospects are proposed to improve the methods of vanadium concentration from technogenic vanadium-containing raw materials.

The article discusses the potential of recycling spent vanadium catalysts used in petrochemical processes, which can be a potential source for vanadium extraction. In addition, vanadium-containing bauxite raw materials, oil and steel production slags can be promising raw materials for further extraction of vanadium

Keywords: *vanadium-containing raw materials, spent vanadium catalysts, bauxite residues, oil residues, leaching*

Введение. Кроме первичных методов существуют также и вторичные процессы, используемые для переработки и извлечения ванадия из различных отходов, таких как отработанные катализаторы [1, 2] и летучая зола, образующаяся при сжигании угля [3, 4]. Эти процессы обычно включают комбинацию гидрометаллургических и пирометаллургических методов для извлечения ванадия из этих вторичных источников. Переработка промышленных отходов, содержащих ванадий, таких как отработанные катализаторы, летучая зола и шлак, является многообещающим источником извлечения ванадия. Следовательно, изучение эффективных методов переработки этих отходов для извлечения ванадия не только может принести экономическую выгоду, но и будет способствовать снижению загрязнения окружающей среды. Другой проблемой является обращение с остатками после выщелачивания или хвостами, которые отправляются в хвостохранилища. Эти остатки могут содержать остаточные металлы или другие загрязняющие вещества, которые требуют надлежащей утилизации или обработки для предотвращения загрязнения окружающей среды. При этом предпринимаются усилия по разработке устойчивых и безвредных для окружающей среды решений для обращения с этими отходами, таких, например, как технологии вторичной переработки.

Эта обзорная статья описывает методы переработки промышленных ванадийсодержащих отходов, а также проблемы и ограничения, связанные с этими методами. Статья также включает последние результаты исследований по переработке ванадийсодержащего сырья и указывает на необходимость дальнейших исследований и разработок для повышения эффективности и устойчивости переработки ванадия. Материал данной статьи может послужить ценным ресурсом для исследователей, инженеров и специалистов металлургической отрасли, занимающихся производством ванадия, а также внести вклад в общее понимание устойчивого управления ресурсами.

1. Методы извлечения ванадия из бокситовых остатков. Красный шлам, также известный как бокситовый остаток, является побочным продуктом производства алюминия и образуется в результате переработки бокситовой руды гидроксидом натрия. Ежегодно во всем мире производится около 150 миллионов тонн бокситовых остатков, состоящих преимущественно из оксида железа, оксида титана и оксида алюминия, но содержащих также и несколько других ценных металлов, включая ванадий [5].

В последние годы извлечению ванадия из бокситовых остатков уделяется значительное внимание в связи с растущим спросом на этот металл в различных отраслях промышленности, таких как производство стали, хранение энергии и катализ. Были исследованы различные методы извлечения ванадия из бокситовых остатков, включая методы физического разделения, выщелачивания и осаждения.

Методы физического разделения, такие как магнитная сепарация, гравитационная сепарация и пенная флотация, используются для отделения ванадийсодержащих фаз от остальной части матрицы бокситовых остатков. Ванадийсодержащие минералы могут быть разделены с помощью магнитной сепарации, основанной на их магнитных свойствах. Также ванадийсодержащие минералы и остальной остаток бокситов разделяются с помощью гравитационного разделения, использующего различия в их

плотности. Кроме того, ванадийсодержащие минералы и жильные минералы в бокситовом остатке отделяются с помощью пенной флотации, использующей различия в их свойствах поверхности.

Методы выщелачивания включают растворение ванадия из матрицы бокситовых остатков с использованием различных химических реагентов. Кислотное выщелачивание является одним из широко используемых методов, при котором для растворения минералов оксида ванадия часто используется серная кислота. Затем фильтрат, содержащий ванадий, подвергается дальнейшей обработке для извлечения металла. Щелочное выщелачивание с использованием гидроксида или карбоната натрия также было исследовано в качестве альтернативного метода извлечения ванадия. Этот метод обладает преимуществом селективного выщелачивания, при котором ванадий растворяется, оставляя в осадке другие ценные металлы, такие как железо и титан [6, 7].

Методы осаждения используются для извлечения ванадия из фильтрата, полученного с помощью методов выщелачивания. Одним из широко используемых методов является экстракция растворителем, при которой органический растворитель используется для селективного извлечения ванадия из фильтрата. Затем экстрагированный ванадий отделяют от органической фазы с использованием соответствующего разделяющего агента для получения концентрированного раствора ванадия. Другой способ осаждения включает использование химических осадителей, таких как метаванадат аммония или метаванадат натрия, для селективного осаждения ванадия из фильтрата. Затем осажденный ванадий может быть подвергнут дальнейшей обработке с получением соединений ванадия или металла [8].

Извлечение ванадия из бокситовых остатков представляет собой сложный процесс, требующий применения различных методов, включая физическое разделение, выщелачивание и осаждение. Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения, и выбор подходящего метода зависит от таких факторов, как состав бокситового остатка, желаемая чистота ванадиевого продукта и экономическая целесообразность процесса. Необходимы дальнейшие исследования и разработки для оптимизации и повышения эффективности этих методов, чтобы обеспечить устойчивое и экономически целесообразное извлечение ванадия из бокситовых остатков.

2. *Методы извлечения ванадия из летучей золы и угля.* Летучая зола (рис. 1) является побочным продуктом сжигания угля на тепловых электростанциях. Летучая зола и уголь содержат незначительные количества ванадия, что делает их потенциальными источниками для его извлечения.

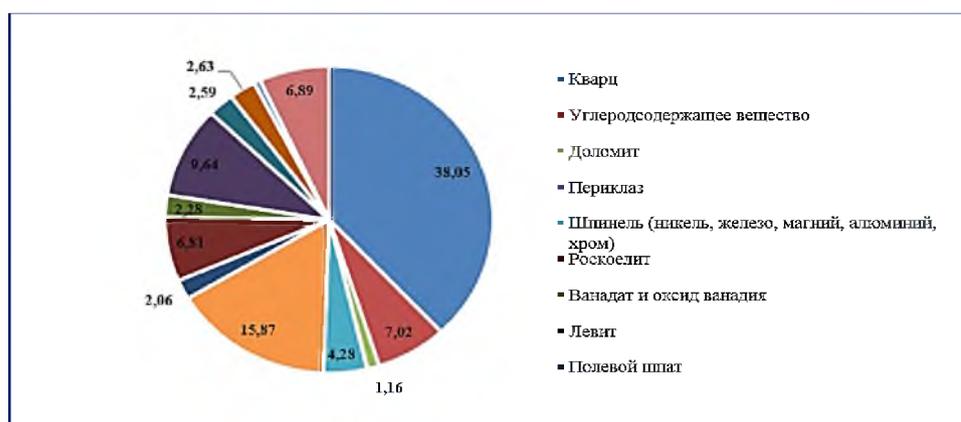


Рисунок 1. Минеральный состав летучей золы

Для извлечения ванадия из летучей золы и угля было разработано и изучено несколько методов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения [9].

Одним из наиболее часто используемых методов извлечения ванадия из летучей золы (рис. 2) является кислотное выщелачивание. Этот процесс включает обработку летучей золы раствором кислоты, обычно серной кислотой, для растворения присутствующего ванадия. Эффективность выщелачивания может быть повышена такими факторами, как температура, концентрация кислоты и размер частиц. В многочисленных исследованиях изучалось влияние этих параметров на процесс выщелачивания. Например, Чен и др. [10] провели эксперименты по оптимизации кислотного выщелачивания ванадия из летучей золы. Они обнаружили, что повышение температуры и концентрации кислоты значительно повышает эффективность извлечения ванадия. Кроме того, уменьшение размера частиц летучей золы увеличило площадь поверхности, доступную для выщелачивания, что привело к более высоким скоростям извлечения ванадия.

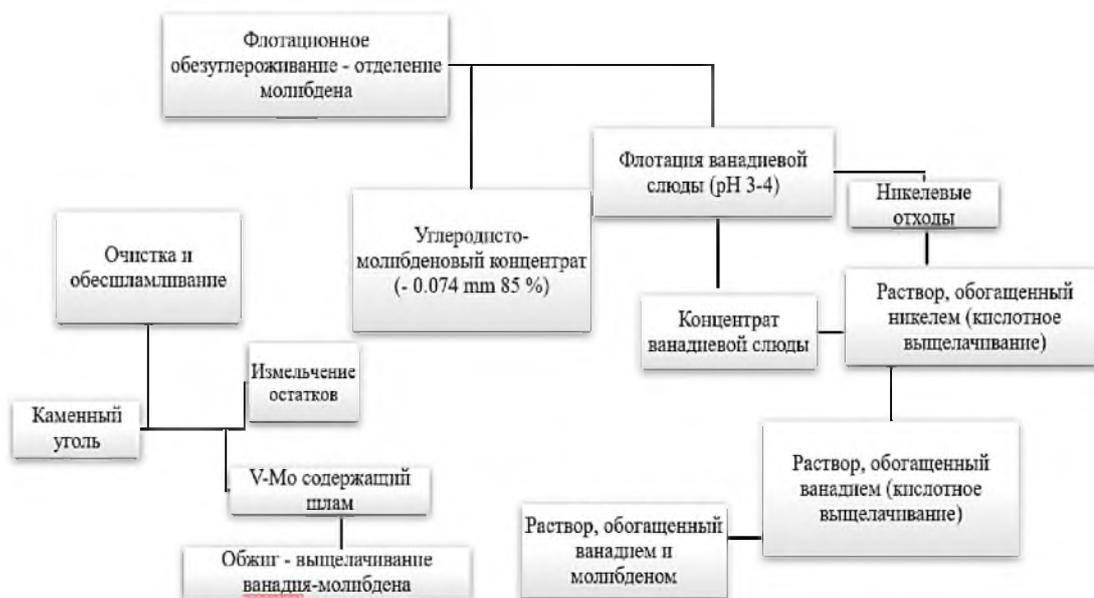


Рисунок 2. Схема извлечения ванадия из каменного угля и перервода его в оксид ванадия (IV)

В работе Wang и др. [11] представлены результаты исследования щелочного выщелачивания ванадия из летучей золы с высоким содержанием кальция. Авторы обнаружили, что добавление хелатирующего агента, такого как ЭДТА (этилендиаминтетрауксусная кислота), повышает эффективность извлечения ванадия за счет уменьшения влияния кальция. В результате исследования был сделан вывод, что щелочное выщелачивание в сочетании с хелатирующим агентом может быть многообещающим методом извлечения ванадия из летучей золы с высоким содержанием кальция.

В исследовании Yang и др. [12] авторы исследовали кислотное выщелачивание ванадия из угольной золы с использованием соляной кислоты. Они обнаружили, что на эффективность выщелачивания влияют такие факторы, как концентрация кислоты, температура и время выщелачивания. Увеличение концентрации кислоты и температуры увеличивало извлечение ванадия, в то время как увеличение времени выщелачивания оказывало уменьшающий эффект.

Обжиг и плавка являются альтернативными методами извлечения ванадия из угля. Обжиг включает нагрев угля в присутствии воздуха или кислорода, который окисляет ванадий до растворимой формы, поддающейся выщелачиванию. С другой стороны, плавка включает восстановление оксидов ванадия в угле до металлического ванадия, который затем может быть отделен и очищен.

3. *Методы извлечения ванадия из нефтяных остатков.* Извлечение ванадия из нефтяных остатков (рис. 3) является важной областью исследований в связи с растущим спросом на ванадий. Нефтяной остаток, также известный как нефтяной кокс, является побочным продуктом процесса переработки нефти и содержит значительное количество ванадия [13]. В Республике Беларусь потенциальным источником ванадийсодержащего вторичного сырья является ванадийсодержащий шлак, образующийся при сжигании мазута в котельных установках электростанций. Концентрация ванадия в нем в десять раз превышает его содержание в традиционном рудном сырье [14, 15].



Рисунок 3. Схема извлечения ванадия из нефти и перевода его в оксид ванадия (IV)

Наиболее распространенными методами извлечения ванадия из нефтяных остатков являются гидрометаллургические процессы. Эти процессы предполагают использование химических растворов для селективного извлечения ванадия из нефтяного кокса. Одним из таких методов является кислотное выщелачивание, при котором нефтяной кокс обрабатывают сильной кислотой, такой как серная кислота или соляная кислота, для растворения ванадия. Полученный раствор обрабатывают для извлечения ванадия путем сорбции или экстракции. В нескольких исследованиях изучалась оптимизация параметров кислотного выщелачивания, таких как концентрация кислоты, температура и время выщелачивания, для повышения эффективности извлечения ванадия [16].

Другой гидрометаллургический метод предполагает использование щелочных растворов для извлечения ванадия. В этом процессе нефтяной кокс обрабатывают сильной щелочью, такой как гидроксид натрия или гидроксид калия, для растворения ванадия. Затем полученный раствор подвергают различным стадиям очистки для выделения ванадия. Исследователи изучили различные факторы, влияющие на процесс

щелочного выщелачивания, включая концентрацию щелочи, температуру реакции и время выщелачивания, чтобы максимизировать извлечение ванадия [17].

В дополнение к гидрометаллургическим методам были исследованы пирометаллургические процессы для извлечения ванадия из нефтяных остатков. Пирометаллургия предполагает использование высоких температур для извлечения и отделения металлов из руд или других материалов. Одним из таких методов является обжиг нефтяного кокса с последующим выщелачиванием раствором кислоты. Процесс обжига преобразует соединения ванадия, присутствующие в нефтяном коксе, в более растворимую форму, облегчая их извлечение на последующей стадии выщелачивания. В исследованиях изучалось влияние температуры, продолжительности обжига и атмосферы на эффективность извлечения ванадия [18].

Кроме того, исследователи изучили возможность использования методов биологического выщелачивания для извлечения ванадия из нефтяных остатков. Биологическое выщелачивание предполагает использование микроорганизмов или продуктов их метаболизма для извлечения металлов из руд или других материалов. В нескольких исследованиях сообщалось об выделении и характеристике устойчивых к ванадию бактерий, способных выщелачивать ванадий из нефтяного кокса. Эти бактерии вырабатывают органические кислоты или ферменты, которые могут растворять ванадий, делая его доступным для извлечения. Для повышения эффективности извлечения ванадия была исследована оптимизация параметров биологического выщелачивания, таких как концентрация бактерий, температура и pH [19].

4. Методы переработки отработанных катализаторов для извлечения ванадия. Одним из важных применений ванадия является его использование в качестве катализатора при производстве серной кислоты. Отработанные ванадиевые катализаторы производства серной кислоты содержат значительное количество ванадия, что делает их извлечение экономически целесообразным и экологически устойчивым процессом [20].

Одним из основных методов, используемых для извлечения ванадия из отработанных катализаторов, является выщелачивание [21]. Выщелачивание (рис. 4) включает растворение ванадийсодержащего материала в подходящем растворителе с последующим отделением и очисткой ванадия.



Рисунок 4. Технологическая схема извлечения ванадия из остатков десиликатизации

Были исследованы различные выщелачивающие агенты, включая серную кислоту, соляную кислоту и щелочные растворы. Выбор выщелачивающего агента зависит от таких факторов, как природа отработанного катализатора и желаемая чистота извлеченного ванадия.

Обычно применяется сернокислотное выщелачивание из-за его совместимости с отработанными ванадиевыми катализаторами, используемыми при производстве серной кислоты. Процесс выщелачивания включает растворение отработанного катализатора в концентрированном растворе серной кислоты с последующим отделением примесей и осаждением соединений ванадия. Содержание ванадия в отработанных катализаторах может варьироваться от 5 % до 25 %, в зависимости от конкретного применения и условий эксплуатации. Эффективность выщелачивания может быть повышена за счет корректировки таких факторов, как температура, концентрация кислоты и время выщелачивания [22].

Выщелачивание соляной кислотой также изучалось в качестве альтернативного метода извлечения ванадия. Этот способ включает растворение отработанного катализатора в соляной кислоте с последующим отделением и очисткой соединений ванадия. По сравнению с сернокислотным выщелачиванием преимущество солянокислотного выщелачивания заключается в более высокой эффективности выщелачивания и меньшем содержании примесей в фильтрате. Однако это требует дополнительных этапов для удаления таких примесей, как железо и алюминий.

Методы щелочного выщелачивания, такие как выщелачивание гидроксидом натрия, были исследованы для извлечения ванадия из отработанных катализаторов. Щелочное выщелачивание обеспечивает преимущество селективного растворения ванадия при минимальном растворении примесей. Процесс выщелачивания включает растворение отработанного катализатора в щелочном растворе с последующим отделением и очисткой соединений ванадия. Однако методы щелочного выщелачивания часто требуют более высоких температур и более длительного времени выщелачивания по сравнению с методами кислотного выщелачивания [23, 24].

После выщелачивания ванадий необходимо отделить и очистить от фильтрата. Для этого используют различные методы разделения, включая экстракцию растворителем, ионный обмен, осаждение и мембранное разделение.

Заключение. В этой обзорной статье всесторонне рассмотрены различные источники, содержащие ванадий, включая отработанные ванадиевые катализаторы, остатки бокситов, нефтяные остатки, и соответствующие технологии их переработки. Результаты исследований, представленные в статье, демонстрируют потенциал этих источников в качестве жизнеспособных и устойчивых альтернатив для производства ванадия.

Отработанные ванадиевые катализаторы, которые образуются в качестве отходов различных промышленных процессов, также были признаны потенциальными источниками ванадия. Переработка этих отработанных катализаторов не только способствует извлечению ванадия, но и благоприятствует снижению загрязнения окружающей среды. Для извлечения ванадия из отработанных катализаторов использовались различные методы, такие как кислотное выщелачивание, прокаливание и экстракция растворителем, что позволило получить значительный выход ванадия.

Бокситы и нефтяные остатки стали нетрадиционными источниками ванадия. Извлечение ванадия из бокситовых остатков, отходов производства глинозема, показало себя многообещающим с помощью различных методов, таких как обжиг, выщелачивание и осаждение. Аналогичным образом, переработка нефтяных остатков, таких как нефтяной кокс и тяжелая нефтяная зола-унос, продемонстрировала потенциал извлечения ванадия с использованием таких методов, как прямое выщелачивание.

Таким образом, разведка и использование ванадийсодержащих источников, обсуждаемые в этой обзорной статье, открывают многообещающие возможности для устойчивого производства ванадия. Кроме того, использование этих источников не

только удовлетворяет растущий спрос на ванадий, но и способствует сокращению образования отходов и загрязнения окружающей среды. Отработанные катализаторы считаются наиболее предпочтительным источником для извлечения ванадия из всех рассмотренных источников. Это предпочтение обусловлено значительным содержанием ванадия в отработанных катализаторах, а также их хорошей растворимостью и пригодностью для использования в технологических процессах. Продолжение исследований и разработок в этой области, несомненно, приведет к дальнейшему прогрессу в производстве ванадия, сделав его более экономически выгодным и экологически устойчивым.

Благодарности. Данное исследование было профинансировано Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP19676107 КН МНВО РК).

References

1. Gonçalves J.M., da Silva M.I., Angnes L. and Araki K. Vanadium-containing electro and photocatalysts for the oxygen evolution reaction: a review *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, doi: 10.1039/c9ta10857b.
2. Zeng, X., Wang, F., Zhang, H., Cui, L., Yu, J., Xu, G. (2015). Extraction of vanadium from stone coal by roasting in a fluidized bed reactor. *Fuel*, 142, 180-188, doi:10.1016/j.fuel.2014.10.068
3. Baigenzhenov, O., Yulussov, S., Khabiyev A., Sydykanov M., Akbarov, M. (2019). Investigation of the leaching process of rare-earth metals from the black shale ores of greater Karatau. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*, 310(3), 76–80. – <https://doi.org/10.31643/2019/6445.31>
4. Khabiyev, A., Baigenzhenov, O., Yulussov, S., Akbarov, M., & Sydykanov, M. (2020). Study of leaching processes of sintered black shale ore. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*, 315(4), 5–10. – <https://doi.org/10.31643/2020/6445.31>
5. Tseng Yi. Sh., Singhanian R. R., Cheng A.-Ch., Chen Ch.-W., Dong Ch.-D., Patel A. K. Removal of heavy metal vanadium from aqueous solution by nanocellulose produced from *Komagataeibacter europaeus* employing pineapple waste as carbon source, *Bioresource Technology*, V. 369, 2023, 128411, ISSN 0960-8524, doi:10.1016/j.biortech.2022.128411
6. Li H., Ren Q., Tian Sh., Wang J., Zhu X., Yang T., Zhang Y., Liu J., Liu J. Estimation of vanadium removal from calcification roasting-acid leaching tailings using ultrasonic-H₂C₂O₄ synergistic technology // *Arabian Journal of Chemistry*, V. 16, I. 12, 2023, 105344, ISSN 1878-5352, doi:10.1016/j.arabjc.2023.105344
7. Wang X., Yang M., Meng Y., Gao D., Wang M., Fu Z. Cyclic metallurgical process for extracting V and Cr from vanadium slag: Part I. Separation and recovery of V from chromium-containing vanadate solution, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 31, Issue 3, 2021, P. 807-816, ISSN 1003-6326, doi:10.1016/S1003-6326(21)65540-1
8. Kologrieva U., Volkov A., Krasnyanskaya I., Stulov P. and Wainstein D. Analysis of Hydrometallurgical Methods for Obtaining Vanadium Concentrates from the Waste by Chemical Production of Vanadium Pentoxide. *Materials* 2022, 15, 938. – <https://doi.org/10.3390/ma15030938>
9. Makhotkina E.S., Shubinab M.V. Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources. *Solid State Phenomena Submitted: 2017-06-16* ISSN: 1662-9779, Vol. 265, pp. 994-998, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.-265.994
10. Chen R., Feng Ch., Tan J., Zhang Ch., Yuan Sh., Liu M., Hu H., Li Q., Hu J. Stepwise separation and recovery of molybdenum, vanadium, and nickel from spent hydrogenation catalyst, *Hydrometallurgy*, Volume 213, 2022, 105910, ISSN 0304-386X, doi:10.1016/j.hydromet.2022.105910
11. Wang H., Feng Y., Li H., Li H., Wu H. Recovery of vanadium from acid leaching solutions of spent oil hydrotreating catalyst using solvent extraction with D2EHPA (P204), *Hydrometallurgy*, V. 195, 2020, 105404, ISSN 0304-386X, doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105404
12. Yang M., Yang J. Vanadium extraction from steel slag: Generation, recycling and management, *Environmental Pollution*. – V. 343, 2024, 123126, ISSN 0269-7491, doi: 10.1016/j.envpol.2023.123126

13. Abdolhnezhad M., Lindsay M. B.J. Geochemical conditions influence vanadium, nickel, and molybdenum release from oil sands fluid petroleum coke // *Journal of Contaminant Hydrology*, V. 245, 2022, 103955, ISSN 0169-7722, doi: 10.1016/j.jconhyd.2022.103955
 14. Xiong X., Wang Z., Cheng Ch., Li M., Yun L., Liu S., Mao L. and Zhou Zh. Long-Term Observation of Mixing States and Sources of Vanadium-Containing Single Particles from 2020 to 2021 in Guangzhou, China, *Toxics* 2023, 11, 339, doi: 10.3390/toxics11040339
 15. Shafer M.M., Toner B.M., Overdier J.T., Schauer J.J., Fakra S.C., Hu Sh., Jorn D. Herner and Ayala A. Chemical Speciation of Vanadium in Particulate Matter Emitted from Diesel Vehicles and Urban Atmospheric Aerosols, *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 189-195, doi: 10.1021/es200463c
 16. Wang X., Wang H., Gao D., Chen B., Meng Y., Wang M. A clean technology to separate and recover vanadium and chromium from chromate solutions. *Hydrometallurgy*, 2018. – doi: 10.1016/j.hydromet
 17. Zhang D., Liu Y., Hu Q., Ke X., Yuan Sh., Liu Sh., Ji X., Hu J. Sustainable recovery of nickel, molybdenum, and vanadium from spent hydroprocessing catalysts by an integrated selective route // *Journal of Cleaner Production*. – V. 252, 2020, 119763, ISSN 0959-6526, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119763
 18. Yu H., Liu Ch., Liu Sh., Gu Y., Wang Sh., Yaraş A., Hu L., Zhang W., Peng M., Arslanoğlu H., Mao L. High-efficiency recycling of Mo and Ni from spent HDS catalysts: Enhanced oxidation with O₂-rich roasting and selective separation with organic acid leaching- complexation extraction // *Journal of Hazardous Materials*. – V. 464, 2024, 132982, ISSN 0304-3894, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.132982
 19. Wu L., Dai Ch., Wang H., Wang J., Dong Y. Leaching of vanadium, potassium, and iron from spent catalyst of the manufacture of sulfuric acid // *Journal of Materials Research and Technology*, V. 11, 2021, P. 905-913, ISSN 2238-7854, doi: 1016/j.jmrt.2021.01.072
 20. Dusengemungu L., Kasali G., Gwanama C., Mubemba B. Overview of fungal bioleaching of metals, *Environmental Advances*, Volume 5, 2021, 100083, ISSN 2666-7657, doi: 10.1016/j.envadv.2021.100083
 21. Etim U.J., Bai P., Liu X., Subhan F., Ullah R., Yan Z. Vanadium and nickel deposition on FCC catalyst: Influence of residual catalyst acidity on catalytic products, *Microporous and Mesoporous Materials*, V. 273, 2019, P. 276-285, ISSN 1387-1811, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.07.011
 22. Beriwal N., Sharma L., Verma A. Powering a vanadium redox flow battery using spent vanadium catalyst: Extraction of direct-use V(IV)/V(III) vanadium precursors // *Journal of Cleaner Production*, V. 429, 2023, 139568, ISSN 0959-6526, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139568
 23. Xiao H., Chen L., Qin Zh., Yin R., Weng D., Wang Zh., Luo D. Separation of vanadium, tungsten and molybdenum from spent SCR catalysts solution by solvent extraction with primary amine N1923, *Waste Management*. – V. 150, 2022. – P. 301-309, ISSN 0956-053X, doi: 10.1016/j.wasman.2022.07.015
-
-