Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2025.59.45.004

УДК 66.097.3

О.С. Данилов, Н.Д. Ванюкова

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ВАНАДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. В настоящей научной работе проводится обзор существующих перспективных технологических решений по переработке ванадиевых катализаторов с извлечением ванадийсодержащих соединений. Акцентируется, что весьма актуальным это является для Арктической зоны Российской Федерации, в частности для рециклинга техногенных отходов системообразующего горно-металлургического комплекса – ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в программе «Серный проект». В качестве наиболее перспективных воздействий для интенсификации процессов переработки и извлечения ванадийсодержащих соединений из отработанных катализаторов на основе критического анализа релевантных литературных источников предложено использование электромагнитного микроволнового излучения (СВЧ-излучения) и ультразвука, как по отдельности, так и в сочетании. По результатам работ сторонних исследователей это позволит ускорить технологический цикл и увеличить выход целевого продукта.

Ключевые слова: ванадиевый катализатор, техногенные отходы, ПАО «ГМК «Норильский никель», ванадийсодержащие соединения, СВЧ-излучение, ультразвук, переработка.

Для цитирования: Данилов О.С., Ванюкова Н.Д. Извлечение ванадийсодержащих соединений из отработанных ванадиевых катализаторов с использованием электромагнитного микроволнового излучения // Управление техносферой: электрон. журнал, 2025. Т.8. Вып.1. С. 37–47. DOI: 10.35634/UdSU.2025.59.45.004.

Актуальность

Норильский промышленный район (НПР) является местом локализации крупнейшего горнометаллургического предприятия Российской Федерации –

ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». НПР входит в Арктическую зону России, поддержка и развитие которой в настоящее время является одной из важнейших задач государства. Функционал работы компании достаточно широк – от разведки месторождений полезных ископаемых до их переработки и реализации на внутреннем и внешнем рынках драгоценных (золото, платина, редкоземельные металлы) и цветных (никель, медь) металлов.

К основным проблемам развития НПР, кроме суровых природно-климатических условий Заполярья, можно отнести:

1) невысокую плотность населения и локализованный характер промышленного развития района;

2) обособленность и значительную дистанцированность от промышленно развитых территорий Сибири и в целом других регионов России;

3) заметный дефицит постоянной рабочей силы;

4) значительные производственные издержки (высокая энергоемкость) и критическая зависимость от полноценного обеспечения товарами, продовольствием и топливом из материковой части страны;

5) негативное влияние на окружающую среду, в частности загрязнение атмосферы выбросами серных соединений предприятиями ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» [1].

В целях нивелирования отрицательного влияния последнего из факторов на здоровье населения Норильского промышленного района Компания разработала программу под названием «Серный проект». Она входит в глобальный проект «Чистый воздух», реализуемый на федеральном уровне. В 2023 году проект начал реализовываться. Основной его целью провозглашено последовательное сокращение сернистых выбросов в атмосферу на 75 % от предприятий, которые входят в структуру компании [2, 3].

Основной идеей в нейтрализации выбросов выступает окисление сернистого газа на ванадиевом катализаторе с получением серной кислоты методом ДК-ДА [4], и ее последующим преобразованием в искусственный гипс, который должен складироваться в специализированном гипсохранилище Компании.

Для получения серной кислоты из сернистых газов ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» использует ванадиевый катализатор в форме ребристой трубки (5-7 ребер), представленный на рис. В результате реализации проекта происходит последовательное формирование значительных объемов техногенных отходов в виде отработанных ванадиевых катализаторов (ОВК).



Рис. Ванадиевый катализатор в форме ребристой трубки

Согласно [5] вопросы рециклинга отработанных катализаторов, содержащих ценные металлы, достаточно актуальны как с точки зрения

улучшения экологии, так и с совершенствованием безотходных и ресурсосберегающих технологических решений.

Важно подчеркнуть, что с экономической точки зрения выгода в вопросе переработки промышленных отходов, в частности ОВК, заключается в том, что концентрация ванадия в них (в перерасчете на V_2O_5) составляет от двух до пятнадцати процентов, что на порядки больше, чем концентрация этого химического элемента в минеральном исходном сырье (0,1-0,2 % V_2O_5) [6].

Шубина с авторами [7] обосновывают актуальность извлечения ванадийсодержащих соединений из техногенного сырья тем, что он весьма востребован в различных отраслях промышленности:

1) цветная металлургия: производство ванадиевых бронз и медно-ванадиевых сплавов, а также сплавов на основе молибдена, ниобия и тантала;

2) черная металлургия: процессы карбидообразования, раскисления и легирования;

3) химическая промышленность: производство серной кислоты;

4) текстильная промышленность: окраска хлопчатобумажных тканей;

5) перспективно применение в производстве полупроводниковых материалов, электрохимических источников тока, в термоядерной энергетике и электротехнике.

Согласно [8] для эффективного извлечения V_2O_5 из отработанных ванадиевых катализаторов в большинстве своем применяются гидрометаллургические методы, технологическое решение которых включает в себя такие стадии как дезинтеграцию катализатора, выщелачивание ванадийсодержащих соединений в различных электролитах и последующее осаждение целевого продукта из растворов выщелачивания.

Критический анализ релевантных теме настоящей статьи отечественных литературных источников показал, что в настоящее время есть перспективные

решения по интенсификации процесса извлечения ванадийсодержащих соединений из ОВК с использованием электрохимической обработки раствора, а также с применением ультразвука и электромагнитного СВЧ-излучения.

Жарский И.М. с коллегами [8] разработали способ интенсификации извлечения ванадия и его соединений из ОВК с применением электрохимической обработки раствора. Согласно заключению исследователей, такой вид обработки раствора обеспечивает 9-кратную интенсификацию процесса извлечения целевых соединений, позволяет гармонично сочетать процессы восстановительного и первичного извлечения и, кроме того, ликвидирует стадию предварительной дезинтеграции отработанного ванадиевого катализатора.

Крышилович Е.В. и Орехова С.Е. в своем исследовании [9] по переработке ОВК с извлечением ванадия предложили в целях повышения результативности технологического процесса использование ультразвукового излучения.

По утверждениям авторов работы применение ультразвука в процессах первичного выщелачивания ванадийсодержащих соединений из ОВК, позволяет более эффективно разрушать исходный материал, перевести его в более мелкодисперсную форму, по сравнению с механическим дроблением. Это обеспечивает более эффективное вскрытие материала и улучшает его взаимодействие с электролитом, что в свою очередь, стимулирует рост скорости растворения отработанного ванадиевого катализатора более чем в 40 раз по сравнению со схемой извлечения без использования УЗ-излучения. При этом, как отмечают авторы работы, степень извлечения ванадийсодержащих соединений возрастает с 35 до 60 %.

Чернышев В.И. с коллегами [10] в качестве интенсифицирующего воздействия на процессы переработки ОВК с получением ценного металла предлагают использовать уникальные свойства электромагнитного

микроволнового (СВЧ) излучения. Как отмечают авторы работы, применение СВЧ-излучения позволяет значительно ускорить технологический процесс переработки ОВК и увеличить от 2 до 4 раз выход ванадийсодержащих соединений.

На наш взгляд, интенсификацию рассматриваемого процесса с использованием СВЧ-излучения можно объяснить с точки зрения его уникальных свойств, таких как [11]:

1) значительная скорость нагрева (сотни °С/мин против ~10°С/мин при обычном нагреве);

2) селективный нагрев, обусловленный природой материала;

3) объемный нагрев.

Резюмируя итоги настоящей научной работы, можно сделать следующие краткие выводы:

1) в рамках реализации программы «Серный проект» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» образуются техногенные отходы в форме отработанных ванадиевых катализаторов, которые рационально перерабатывать с извлечением ванадийсодержащих соединений;

2) с точки зрения автора работы, наиболее оптимальными схемами переработки ОВК с извлечением ванадийсодержащих соединений являются технологические решения с использованием ультразвукового воздействия или СВЧ-излучения, либо их комбинации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьева Ю.А. Концептуальная модель Норильского промышленного кластера // Дискуссия. 2016. №6 (69). С. 48 – 56.

2. Серный проект ПАО «ГМК «Норильский никель». URL: https://ar2017.nornickel.ru/pdf/ar/ru/business-group_key-projects_sulphur-project.pdf?ysclid=lugtxh6sng245025649. (дата обращения 31.03.2024).
3. В Заполярье стартовал экологический проект «Серная программа». URL: https://lenta.ru/news/2023/10/26/dioksid/?ysclid=lugtzthdn6523359087 (дата обращения 31.03.2024).
4. Андриянова В.К. Улучшение ванадиевого катализатора для сернокислотного производства // Россия молодая: материалы XII Всеросс. науч.-практич. конф. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2020. URL: https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2020/RM20/pages/Articles/74201.pdf (дата обращения 31.03.2024).
5. Изучение возможности рекуперации молибдена из отработанного катализатора дегидрирования изоамиленов в изопрен / Р.Г. Романова, Р.В. Ермолаев, А.А. Ламберов, Х.Х. Гильманов, Р.Р. Гильмуллин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 16. С. 316 – 319.
6. Вытоптова А.И. Извлечение ванадия из вторичного сырья // Россия молодая // XII Всеросс. науч.-практич. конф. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2020. URL: https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2020/RM20/pages/Articles/74205.pdf (дата обращения 31.03.2024).
7. Ванадийсодержащие минеральные и техногенные материалы Шубина М.В., Махоткина Е.С., Горбунова А.В., Мукаев Е.Г., Чуриллов А.Е. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т.2. С. 72 – 75.
8. Жарский И. М. и др. Регенерация V_2O_5 из растворов выщелачивания отработанных ванадиевых катализаторов // Свиридовские чтения: сб. ст. Минск: БГУ, 2008. Вып. IV. С. 55 – 59.
9. Крышилович Е.В., Орехова С.Е. Выделение соединений ванадия из ванадийсодержащих отходов сернокислотного производства. URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/50063?locale=ru&ysclid=lui5gd6liw773712040 (дата обращения 31.03.2024).

10. Чернышев В.И., Тертышный И.Г., Шустов С.В. Применение СВЧ-энергии для выделения благородных и редких металлов из отработанных катализаторов и техногенных отходов // Катализ в промышленности. 2006. № 1. С. 15–16.
11. Стенд для исследований по СВЧ нагреву и превращению веществ // А.В. Аржанников, Т.Д. Ахметов, П.В. Калинин, К.И. Меклер, В.Д. Степанов. Новосибирск: ИЯФ, 2004. 19 с. URL: https://inp.nsk.su/images/preprint/2004_002.pdf?ysclid=lujq6r1oii792089552 (дата обращения 31.03.2024).

Поступила в редакцию: 09.01.2025

Сведения об авторах

Данилов Олег Сергеевич
Доцент, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», 663305, ул. 50 лет Октября, 7, г. Норильск, Россия.
E-mail: danilovOS@norvuz.ru

Ванюкова Наталия Дмитриевна
Заведующая кафедрой «Металлургии и цветных металлов», доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», 663305, ул. 50 лет Октября, 7, г. Норильск, Россия.
E-mail: vanyukovand@norvuz.ru

O.S. Danilov, N.D. Vanyukova

EXTRACTION OF VANADIUM-CONTAINING COMPOUNDS FROM DEAD VANADIUM CATALYSTS USING ELECTROMAGNETIC MICROWAVE RADIATION

Annotation. This scientific paper provides an overview of existing promising technological solutions for the processing of vanadium catalysts with the extraction of vanadium-containing compounds. It is emphasized that this is very relevant for the Arctic zone of the Russian Federation, in particular for the recycling of manufactured waste of the backbone mining and metallurgical complex - ZF PJSC MMC Norilsk Nickel in the Sulfur Project program. As the most promising impacts for the intensification of the processes of processing and extraction of vanadium-containing compounds from spent catalysts, based on a critical analysis of relevant literary sources, the use of electromagnetic microwave radiation (microwave radiation) and ultrasound, both separately and in combination, is proposed. According to the results of third-party researchers, this will speed up the technological cycle and increase the yield of the target product.
Keywords: Vanadium catalyst, manufactured waste, PJSC MMC Norilsk Nickel, vanadium-containing compounds, microwave radiation, ultrasound, recycling.

For citation: Danilov O.S., Vanyukova N.D. [Extraction of vanadium-containing compounds from dead vanadium catalysts using electromagnetic microwave radiation]. *Upravlenie tekhnosferoi,* 2028, vol. 8, issue 1, pp. 37–47. DOI: 10.35634/UdSU.2025.59.45.004. (In Russ.).

REFERENCES

1. Murav'eva Yu.A. Konceptual'naya model' Noril'skogo promyshlennogo klastera [Conceptual model of the Norilsk industrial cluster]. *Diskussiya* [*Discussion*]. 2016, no. 6 (69), pp. 2016, 48 – 56. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
2. *Sernyj proekt PAO «GMK «Noril'skij nikel'*. [The sulfur project of PJSC MMC Norilsk Nickel]. Available at**:** https://ar2017.nornickel.ru/pdf/ar/ru/business-group_key-projects_sulphur-project.pdf?ysclid=lugtxh6sng245025649. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
3. *Zapolyar'e startoval ekologicheskij proekt «Sernaya programma».* [The environmental project "Sulfur Program" has been launched in the Arctic]. Available at**:** https://lenta.ru/news/2023/10/26/dioksid/?ysclid=lugtzthdn6523359087 (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
4. Andriyanova V.K. Uluchshenie vanadievogo katalizatora dlya sernokislotnogo proizvodstva [Improvement of the vanadium catalyst for sulfuric acid production]. *Rossija molodaja: material*

XII Vseross. nauch.-praktich. konf. [*Young Russia: materials of XII All-Russian Scientific and Practical Conference*]. Kemerovo: Publ., KuzGTU 2020. Available at**:** https://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/RM/2020/RM20/pages/Articles/74201.pdf. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).

5. Romanova R.G., Ermolaev R.V., Lamberov A.A., Gil'manov H.H., Gil'mullin R.R. Izuchenie vozmozhnosti rekuperacii molibdena iz otrabotannogo katalizatora degidrirovaniya izoamilenov v izopren [Study of the possibility of molybdenum recovery from a spent catalyst for isoamylene dehydrogenation to isoprene]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. [*Bulletin of Kazan Technological University*]. 2012, vol. 15, no. 16, pp. 316 – 319. (In Russ.).
6. Vytoptova A.I. Izvlechenie vanadiya iz vtorichnogo syr'ya [Extraction of vanadium from secondary raw materials]. *Rossija molodaja: material XII Vseross. nauch.-praktich. konf.* [*Young Russia: materials of XII All-Russian Scientific and Practical Conference*]. Kemerovo: Publ., KuzGTU, 2020 Available at**:** https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2020/RM20/pages/Articles/74205.pdf. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
7. Shubina M.V., Mahotkina E.S., Gorbunova A.V., Mukaev E.G., Churillov A.E. Vanadijsoderzhashchie mineral'nye i tekhnogennye materialy [Vanadium-containing mineral and man-made materials]. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya.* [*Actual problems of modern science, technology and education*]. 2017, vol.2, pp. 72 – 75. (In Russ.).
8. Zharskij I. M. (eds). Regeneraciya V2O5 iz rastvorov vyshchelachivaniya otrabotannyh vanadievyh katalizatorov [Regeneration of V2O5 from leaching solutions of spent vanadium catalysts]. *Sviridovskie chteniya* [*Sviridov readings*]: sb. st. Minsk: BSU, 2008, vol. IV, pp. 55 – 59. (In Russ.).
9. Kryshilovich E.V., Orekhova S.E. *Vydelenie soedinenij vanadiya iz vanadijsoderzhashchih othodov sernokislotnogo proizvodstva*. [Isolation of vanadium compounds from vanadium–containing sulfuric acid production waste]. Available at: https://elib.belstu.by/handle/123456789/50063?locale=ru&ysclid=lui5gd6liw773712040. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
10. Chernyshev V.I., Tertyshnyj I.G., Shustov S.V. Primenenie SVCH-energii dlya vydeleniya blagorodnyh i redkih metallov iz otrabotannyh katalizatorov i tekhnogennyh othodov [The use

of microwave energy for the extraction of precious and rare metals from spent catalysts and man-made waste] *Kataliz v promyshlennosti* [*Catalysis in industry*]. 2006, no.1, pp. 15–16. (In Russ.).

11. Arzhannikov A.V., Ahmetov T.D., Kalinin P.V., Mekler K.I., Stepanov V.D. *Stend dlya issledovanij po SVCH nagrevu i prevrashcheniyu veshchestv*. [Stand for research on microwave heating and transformation of substances]. Novosibirsk: IYAF, 2004, 19 p. Available at: https://inp.nsk.su/images/preprint/2004_002.pdf?ysclid=lujq6r1oii792089552. (Accessed: 31.03.2024). (In Russ.).

Received: 09.01.2025

About the Authors

Danilov Oleg Sergeevich
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "N.M. Fedorovsky Polar State University", 663305, ul. 50 let Oktyabrya, 7, Norilsk, Russia.
E-mail: danilovOS@norvuz.ru

Natalia Dmitrievna Vanyukova
Head of the Department of Metallurgy and Non-Ferrous Metals, Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "N.M. Fedorovsky Polar State University", 663305, 50 let Oktyabrya str., 7, Norilsk, Russia.
E-mail: vanyukovand@norvuz.ru