

Анализ вещества

Substances analysis

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-5-11>**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВСКРЫТИЯ УПОРНОГО СПЛАВА
НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ И РОДИЯ**

© Анастасия Владимировна Егошина*, Галина Борисовна Слепченко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30;

*e-mail: antaresave@mail.ru

*Статья поступила 6 июня 2023 г. Поступила после доработки 9 августа 2023 г.
Принята к публикации 24 августа 2023 г.*

Сплавы на основе металлов платиновой группы обладают высокой химической стойкостью, что вызывает ряд трудностей при их растворении. На сегодняшний день среди гидрометаллургических методов растворение в царской водке является одним из наиболее эффективных способов вскрытия коррозионно-стойких сплавов. Основным недостатком этого метода — выделение токсичных газообразных веществ, таких как нитрозилхлорид и оксиды азота. Чтобы уменьшить объем выделяющихся газов без снижения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) системы в данной работе предложен способ растворения Pt – Rh сплава в HCl – HNO₃ с дозированным добавлением HNO₃ при заданном значении окислитель-восстановительного потенциала системы. Потенциал системы, выбранный на основании потенциалов систем HNO₃ – HCl – Pt и HNO₃ – HCl – Rh, составил 0,85 и 0,9 В. В работе также исследовано влияние дисперсности и дефектности Pt – Rh сплава на показатели его растворения. В результате показано, что растворение Pt – Rh сплава с содержанием родия 15 % в HCl – HNO₃ при постоянном значении ОВП = 0,9 В по сравнению с классическим использованием смеси HCl и HNO₃ в объемном отношении 1:3 позволяет снизить расход азотной кислоты на 40 %, сократить время процесса, увеличить коэффициент извлечения как для платины, так и для родия, а также уменьшить объем выделяющихся оксидов азота в два раза (теоретический расчет). Установлено, что процесс механоактивации сплава сокращает время растворения и приводит к практически количественному растворению образца.

Ключевые слова: платинородиевый сплав; растворение; царская водка.**INTENSIFICATION OF OPENING A THRUST ALLOY
BASED ON PLATINUM AND RHODIUM**

© Anastasia V. Egoshina*, Galina B. Slepchenko

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Lenina prosp., 30; *e-mail: antaresave@mail.ru

Received June 6, 2023. Revised August 9, 2023. Accepted August 24, 2023.

A high chemical resistance inherent in the alloys based on platinum group metals is one of the reasons for a number of difficulties that arise when dissolving such materials. Nowadays, the dissolution in aqua regia is one of the most effective methods for dissolving corrosion-resistant alloys. The main disadvantage of this method is a release of toxic gaseous substances such as nitrosyl chloride and nitrogen oxides. To decrease the volume of gases thus released without reducing the redox potential of the system, we proposed a method of dissolving a Pt – Rh alloy in HCl-HNO₃ with a controlled dosed supply of HNO₃ at a given value of the oxidation-reduction potential (ORP) of the system. The potential of the system has been chosen proceeding from the potential for HNO₃ – HCl – Pt and HNO₃ – HCl-Rh systems and amounted to 0.85 and 0.9 V. The impact of the dispersion and the inherent flaw of PtRh alloys on the dissolution indices of the alloy was also considered. It is shown that the dissolution of a Pt – Rh alloy with a rhodium content of 15 % in HCl – HNO₃ at a constant value of ORP = 0.9 V compared to the use of the classic mixture (HCl:HNO₃ = 1:3 vol.) provides a decrease in nitric acid consumption by 40%, reduction of the process time, increase in the recovery factor for both platinum and rhodium, and a two-fold reduction of the volume of released nitrogen oxides (theoretical calculation). It is also revealed that the process of mechanical

activation of the alloy reduces the dissolution time and leads to almost quantitative dissolution of the sample.

Keywords: platinum rhodium alloy; dissolution; aqua regia.

Введение

Сплавы на основе родия широко применяют в различных сферах: при изготовлении термопар в области высоких температур до 2000 °C [1], детекторов в реакторах для изменения потока нейтронов [2], каталитических фильтров-нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей [3], а также в качестве электроконтактных материалов [4]. Платинородиевые сплавы характеризуются высоким сопротивлением ползучести при температурах выше 1000 °C, что в значительной степени определило их широкое применение в стекольной промышленности [5].

Благодаря добавке родия, который является кинетически заторможенным металлом, увеличивается коррозионная стойкость таких сплавов. Так, сплав с содержанием родия 10 % устойчив в атмосфере хлора, а с содержанием 40 % — в царской водке. Это, в свою очередь, создает ряд проблем, связанных с переработкой подобных материалов.

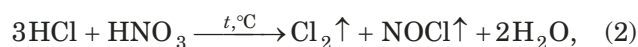
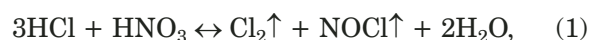
На сегодняшний день известно несколько методов вскрытия подобных сплавов в зависимости от состава материала. В целом эти методы можно разделить на пиро- и гидрометаллургические. К пирометаллургическим методам, применяемым при высоких температурах, относят спекание с пероксидом натрия, пероксидом бария или более активным металлом (олово, цинк, свинец). В большинстве случаев пирометаллургические методы весьма энергоемки и не гарантируют высокой степени извлечения металлов пробы в раствор [6].

Из гидрометаллургических методов можно выделить жидкофазное хлорирование и растворение в царской водке, так как для эффективного вскрытия коррозионно-стойких сплавов необходимы системы с высоким окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП). Многие исследования были направлены на повышение эффективности вскрытия благородных металлов при использовании гидрометаллургических операций. Альтернативой растворению в царской водке выступает солянокислое выщелачивание с применением в качестве окислителей пероксида водорода [7] или газообразного хлора [8].

Согласно литературным данным время выщелачивания может быть значительно уменьшено за счет использования микроволнового нагрева, хотя механизм взаимодействия микроволн с гидрометаллургическими системами малоизучен [9, 10].

В условиях отсутствия газообразного хлора альтернативным методом вскрытия является растворение в царской водке, поэтому вскрытие платинородиевого сплава мы проводили, используя именно этот способ.

Известно, что смесь азотной и соляной кислот, известная как царская водка, является сильным окислителем. Ее сильные окислительные способности обусловлены образующимися атомарным хлором и хлоридом нитрозила [11, 12]:



Итого:



Однако основным недостатком использования этого способа является выделение токсичных газообразных веществ, таких как нитрозилхлорид и оксиды азота. В данной работе предлагается снизить объем выделяющихся газов без уменьшения ОВП системы за счет дозированного добавления HNO_3 .

Вторым аспектом, изученным в представленной работе, является влияние изменения дисперсности и дефектности Pt – Rh сплава на его растворимость, поскольку известно, что скорость растворения зависит от значения площади поверхности твердой фазы. Одним из способов увеличения дисперсности частиц является механоактивация: помимо измельчения, в процессе механоактивации происходит накопление структурных дефектов, что увеличивает химическую активность материала [13].

Так, в работе [14] установлено, что механоактивация оказывает наибольшее влияние на родий по сравнению с другими металлами платиновой группы (МПГ). Авторами также было исследовано влияние механоактивации на сплав меди с добавлением палладия, родия и платины. Показано, что при его растворении в смеси азотной и соляной кислот после механоактивации степень извлечения платины и палладия выросла на 35 %, а родия — увеличилась в два раза по сравнению с выщелачиванием сплава без механоактивации.

Цель работы — интенсификация процесса вскрытия упорного сплава на основе платины и

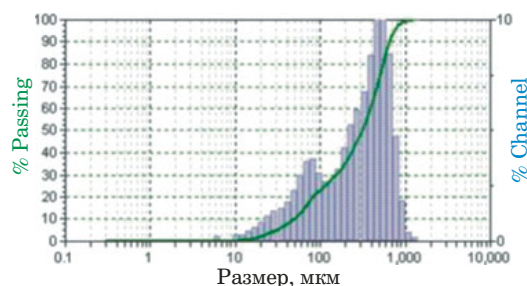


Рис. 1. Дифференциальная гистограмма распределения частиц по размерам образца сплава Pt – Rh15

Fig. 1. Differential histogram of the particle size distribution of a Pt – Rh15 alloy sample

родия и использование комплексного подхода, заключающегося в растворении сплава в смеси HNO_3 – HCl оптимизированным способом после предварительной механоактивации.

Экспериментальная часть

Методы исследования и характеристика Pt – Rh сплава. Гранулометрический анализ сплавов проводили с использованием анализатора размера частиц Microtrac S-3500.

Элементный состав раствора исследовали с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP-6500 (Thermo Scientific Corp., США).

Морфологию частиц сплава исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JEOL 6610 LV (РЭМ).

Механоактивацию проводили с применением лабораторной планетарной мельницы АГО-2С. В специальный стакан загружали порошок сплава и мелющие тела — стальные шары ($m = 200$ г) в объемном соотношении 1:10. Время механоактивации составляло 10 мин. Далее смесь сплава и шаров просеивали через сито для удаления шаров.

Элементный состав порошкообразных образцов исследовали с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Clever C-31 (рентгеновская трубка с Rh-анодом, SSD детектор с электроохлаждением на элементе Пельтье).

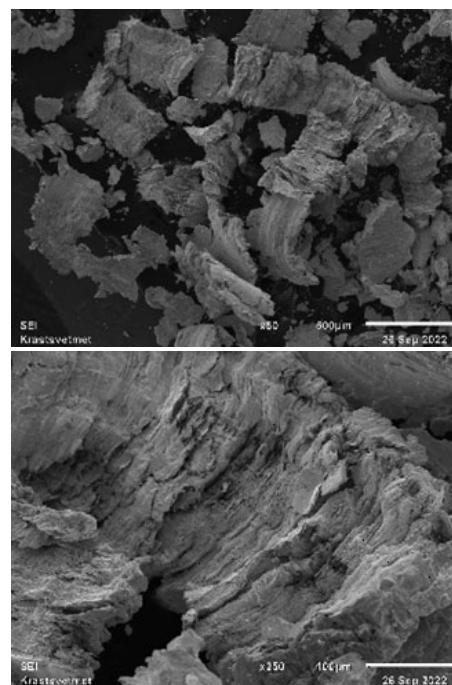


Рис. 2. Изображение частиц сплава (увеличение 50 и 250)

Fig. 2. Image of alloy particles (magnification 50 and 250)

Окислительно-восстановительный потенциал растворов измеряли с помощью одноканального портативного pH-метра/иономера S8 Mettler Toledo Seven2Go с электродом Mettler Toledo серии InLab Redox Ag/AgCl (температурный диапазон — 0 – 100 °C, точность Redox — $\pm 0,1$ мВ).

Для взятия навесок использовали аналитические весы Mettler Toledo XS204.

В работе применяли следующие реактивы: азотная кислота (ГОСТ 4461–77), соляная кислота (ГОСТ 3118–77), дистиллированная вода, сплав на основе платины Pt – Rh x , где $x = 5, 10, 15$ (ГОСТ 30649–99).

Объектом исследования является стружка платинородиевого сплава с содержанием родия 15 %. В табл. 1 представлены результаты гранулометрического анализа сплава, а на рис. 1 — дифференциальная гистограмма распределения частиц по размерам.

Таблица 1. Результаты гранулометрического анализа Pt – Rh сплава

Table 1. Results of granulometric analysis of a Pt – Rh alloy

Средний размер частиц MV, определенный из объемного распределения, мкм	334,3
Минимальный размер частиц, мкм	13,01
Доля частиц с минимальным размером, %	0,2
Доля частиц с максимальным размером, %	0,2
Преимущественный диапазон размеров частиц, мкм	209,3 – 837,2

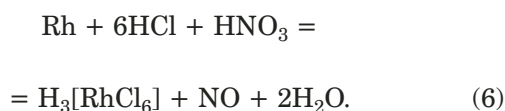
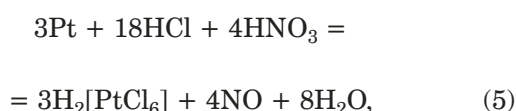
Согласно исследованиям гранулометрического состава средний размер частиц лежит в диапазоне 210 – 840 мкм. Гистограмма имеет бимодальное распределение, так как частицы сплава представляют собой стружку, полученную точкой сплава.

На рис. 2 представлено изображение частиц, полученное методом растровой электронной микроскопии. По результатам РЭМ видно, что сплав имеет деформированную поверхность. Данный факт объясняется тем, что при снятии стружки частицы дополнительно ломаются вследствие высокой твердости сплава.

Методики вскрытия Pt – Rh сплава. Эксперименты по растворению сплава проводили следующим образом.

Метод 1. Классическое растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот. Навеску сплава массой 10 г помещали в колбу, добавляли смесь азотной и соляной кислот в объемном соотношении 1:3. Растворение проводили при температуре 80 °С в течение 3 ч. Во время процесса растворения фиксировали значение ОВП каждые 30 мин. По окончании эксперимента раствор фильтровали и анализировали. Нерастворившийся сплав промывали водой, сушили, взвешивали и анализировали.

Метод 2. Растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот с соотношением $\text{HNO}_3:\text{HCl} = 1:4,8$. Соотношение азотной и соляной кислот описывается химическими уравнениями (1), (2) и составляет 1:3. Однако при рассмотрении уравнений, описывающих взаимодействие металлов с кислотами, соотношение меняется и составляет $\text{HNO}_3:\text{HCl} = 1:4,8$ об.



Аналогично первому эксперименту растворяли как исходный, так и подвергшийся механоактивации сплав.

Метод 3. Растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот с дозированием азотной кислоты осуществляли следующим образом. Навеску сплава массой 10 г помещали в колбу, добавляли 47 мл соляной кислоты и нагревали до температуры 80 °С, далее фиксировали значение ОВП и прикапывали азотную кислоту (конц.) по 0,1 мл до объема, при котором достигается необходимое значение ОВП. Время эксперимента составляло 3 ч.

Обсуждение результатов

Растворение как платины, так и родия в царской водке объясняется образованием устойчивых комплексов $[\text{PtCl}_4]^{2-}$, $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ и $[\text{RhCl}_6]^{3-}$, что ведет к уменьшению потенциала восстановительной системы.

Из-за преобладающей доли платина вносит больший вклад в потенциал системы при растворении сплава. При этом стандартные значения ОВП для платины, следующие: $E_{\text{PtCl}_4^{2-}/\text{Pt}} = 0,73 \text{ В}$ и $E_{\text{PtCl}_6^{2-}/\text{PtCl}_4^{2-}} = 0,68 \text{ В}$ [15]. Значение стандартного электродного потенциала в системе азотная кислота — соляная кислота составляет 0,96 В [15].

Классическое растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот. В качестве реперной точки для дальнейших исследований использовали известный способ перевода драгоценных металлов в раствор — смесь азотной и соляной кислот в соотношении 1:3 об. По результатам растворения за 3 ч в раствор перешло 71,4 % платины и 81,2 % родия. При этом значение ОВП в начале эксперимента составило 0,90 В, а спустя три часа снизилось до 0,85 мВ.

Падение ОВП системы свидетельствует о том, что со временем ее окислительная способность уменьшается ввиду снижения концентрации высокоактивных продуктов, в том числе, ассоциатов, диоксида азота, хлора и нитрозилхлорида. Предполагается также, что реакцию разложения нитрозилхлорида ускоряет наличие самого сплава в системе. Известно, что платиновые металлы, в том числе платина и родий, обладают высокой каталитической активностью [16].

Растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот с соотношением $\text{HNO}_3:\text{HCl} = 1:4,8$. По результатам растворения сплава при данном соотношении кислот за 3 ч степень извлечения платины и родия в раствор составила 73,7 и 63,5 % соответственно. Изменение объема соляной кислоты в процессе растворения сплава не приводит к ощутимому результату — незначительное увеличение перехода платины в раствор и, как следствие, убыль массы сплава. Однако стоит заметить, что в случае родия ситуация неоднозначная. В результате опыта доля родия, перешедшая в раствор, составила 63,5 %, тогда как при классическом вскрытии она составляла 81,2 %.

Для исследования кинетики растворения сплава во времени сплав растворяли в течение 9 ч. На рис. 3 представлена зависимость перехода платины и родия в раствор от времени. За 9 ч эксперимента в раствор перешло 86 % платины и 81 % родия. При этом стоит отметить, что со временем скорость растворения сплава меняется. После трех часов эксперимента скорость

растворения металлов уменьшилась больше чем в 4 раза. После 7 ч растворения зависимость перехода металла в раствор от времени выходит на плато, как в случае платины, так и родия.

По результатам опыта можно сказать, что растворение сплава в смеси кислот эффективно в течение первых трех часов, затем скорость растворения заметно уменьшается. Это подтверждает график зависимости значения ОВП от времени, на котором можно увидеть три явных участка убывающей функции.

Помимо изменения соотношения кислот в процессе растворения, в работе также было исследовано влияние механоактивации на процесс растворения платинородиевого сплава. В табл. 2 представлены основные характеристики гранулометрического состава сплава до и после механоактивации. По данным анализа видно, что после механоактивации размер частиц существенно уменьшился.

В результате экспериментов установлено, что после 10 мин механоактивации сплава полный перевод платины и родия в раствор достигается за 1 час. При этом растворение сплава было проведено как при классическом соотношении кислот, так и с большим объемом соляной кислоты. Данный факт объясняется уменьшением размера частиц, а также, как предполагают авторы, накоплением структурных дефектов.

Растворение сплава в смеси азотной и соляной кислот с дозированием азотной кислоты. Описанные выше эксперименты приводят к выводу, что для поддержания высокого значения

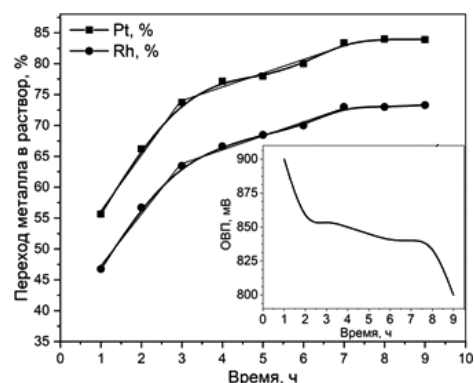


Рис. 3. Зависимость степени перехода платины и родия в раствор от времени

Fig. 3. Time dependence of platinum and rhodium transition into solution

ОВП системы необходимо азотную кислоту вводить дозированно.

В качестве постоянного значения ОВП системы в течение всего времени растворения выбрали два значения — 0,85 В и 0,90 В относительно Ag/AgCl. При выборе значения авторы руководствовались тем, что максимально возможное значение ОВП системы HCl – HNO₃ – PtRh составляло 0,90 В относительно Ag/AgCl. В табл. 3 представлены результаты всех экспериментов по растворению платинородиевого сплава.

Растворение механоактивированного сплава происходит за меньшее время по сравнению с растворением исходных сплавов. При растворе-

Таблица 2. Основные характеристики гранулометрического состава Pt – Rh сплава

Table 2. The main characteristics of the granulometric composition of a Pt – Rh alloy

Сплав	Исходный	Механоактивированный
Средний размер частиц MV, определенный из объемного распределения, мкм	334,3	157,4
Минимальный размер частиц, мкм	13,1	6,5
Максимальный размер частиц, мкм	1408,0	352,0
Преимущественный диапазон размеров частиц, мкм	209,3 – 837,2	148,0 – 296,0

Таблица 3. Результаты экспериментов по вскрытию Pt – Rh сплава ($n = 3$; $P = 0,95$)

Table 3. Results of experiments in opening Pt – Rh alloy ($n = 3$; $P = 0,95$)

Способ вскрытия		Время, ч	Степень извлечения Pt в раствор, %	Степень извлечения Rh в раствор, %	Соотношение HNO ₃ :HCl, об.
1	Классическое растворение сплава	9	71,4 ± 1,4	81,2 ± 2,4	1,0:3,0
2	Растворение сплава при соотношении HNO ₃ :HCl = 1:4,8 об.	Исходный сплав	9	73,7 ± 1,5	63,5 ± 1,9
		После механоактивации	1	98,3 ± 1,7	98,6 ± 1,4
3	Растворение сплава методом дозирования HNO ₃	При ОВП 0,85 В	3	60,9 ± 1,2	60,9 ± 1,2
		При ОВП 0,90 В	3	84,2 ± 1,7	87,1 ± 2,6

нии исходного сплава по результатам экспериментов видно, что наиболее эффективным способом вскрытия является метод с дозированным введением азотной кислоты. Важным условием в таком растворении является постоянное поддержание значения ОВП равным или выше 0,9 В. При этом расход азотной кислоты, затраченной в опыте с ее дозированием в два раза меньше, чем в опыте с классическим соотношением кислот.

По приблизительным расчетам при таком способе вскрытия происходит уменьшение объема выделяющихся оксидов азота в два раза, что также является немаловажным преимуществом.

Однако за выбранный промежуток времени не удалось полностью перевести металлы в раствор. Авторами было установлено, что для полного вскрытия образца сплава необходимо увеличить время в 1,5 раза.

Таким образом, на основе полученных результатов рекомендуется проводить растворение сплавов с содержанием родия 15 % с дозированным введением азотной кислоты при постоянном поддержании ОВП равным 0,9 В. Для ускорения процесса растворения предварительно можно провести механоактивацию сплава.

Заключение

Изучено растворение сплава на основе платины с долей родия 15 % в смеси азотной и соляной кислот. Установлено, что наиболее эффективно процесс растворения Pt – Rh сплава протекает в смеси соляной и азотной кислот при постоянном значении ОВП 0,9 В. Поддержание необходимого значения ОВП достигается путем дозированного введения азотной кислоты. Разработанная методика позволяет сократить объем необходимой для процесса азотной кислоты на 40 %, объем выделяющихся в процессе растворения газообразных веществ — в два раза, а также уменьшить время растворения сплава (в три раза). Помимо этого, были получены данные о положительном влиянии механоактивации на процесс растворения сплава (увеличение скорости растворения в 9 раз).

ЛИТЕРАТУРА

1. Геращенко О. А., Гордое А. Н., Еремина А. К. и др. Температурные измерения: справ. — Киев: Наукова думка, 1989. — 704 с.
2. Пиксайкин В. М., Пшакин Г. М., Роценко В. А. Обзор методов и приборов для определения незаъявленных ядерных материалов и деятельности / Наука и всеобщая безопасность. 2006. Т. 14. № 1. С. 49 – 72.
3. Алексеева Т. Ю., Карпов Ю. А., Дальнова О. А. и др. Современное состояние и проблемы аналитического контроля отработанных автомобильных катализаторов (обзор). Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 11. С. 5 – 14. DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-11-5-14

4. Аринова А. Б., Дмитриенко В. П. Основные особенности и перспективы развития технологии восстановления родия / Успехи современной науки. 2019. № 1. С. 13 – 18.
5. Муфтахова О. С. Обзор ситуации на мировом рынке цветных металлов за 2014 год / Евразийское Научное Объединение. 2015. Т. 2. № 6. С. 83 – 87.
6. Suoranta T., Zugazua O., Niemelä M., Perämäki P. Recovery of palladium, platinum, rhodium and ruthenium from catalyst materials using microwave-assisted leaching and cloud point extraction / Hydrometallurgy. 2015. Vol. 154. P. 56 – 62. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.03.014
7. Kizilaslan E., Aktas S., Sesen M. K. Towards environmentally safe recovery of platinum from scrap automotive catalytic converters / Turkish J. Eng. Environ. Sci. 2009. Vol. 33. N 2. P. 83 – 90. DOI: 10.3906/muh-0901-10
8. Al-Harashsheh M., Kingman S., Bradshaw S. The reality of non-thermal effects in microwave assisted leaching systems? / Hydrometallurgy. 2006. Vol. 84. N 1 – 2. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.03.056
9. Jafarifar D., Daryanavard M. R., Sheibani S. Ultra fast microwave-assisted leaching for recovery of platinum from spent catalyst / Hydrometallurgy. 2005. Vol. 78. N 3 – 4. P. 166 – 171. DOI: 10.1016/j.hydromet.2005.02.006
10. Upadhyay A. D., Lee J., Kim, E., et al. Leaching of platinum group metals (PGMs) from spent automotive catalysts using electro-generated chlorine in HCl solution / J. Chem. Technol. Biotechnol. 2013. Vol. 88. P. 1991 – 1999. DOI: 10.1002/jctb.4057
11. Буслаева Т. М. Химия и технология платиновых металлов (лекционный курс). <https://doc4web.ru/uploads/files/195/85fe236baa6d7ec75f4f13bafabed9d5.docx?ysclid=1mp79jobr134259798> (дата обращения 5 июня 2023).
12. Njelic B., Raff J. D., Finlayson-Pitts B., et al. Catalytic role for water in the atmospheric production of ClNO / J. Phys. Chem. A. 2010. Vol. 114. N 13. P. 4609 – 4618. DOI: 10.1021/jp912155a
13. Литвинцев В. С., Мельникова Т. Н., Ятлукова Н. Г., Литвинова Н. М. Механоактивация в процессах рудоподготовки / ГИАБ. 2005. № S3. С. 306 – 311.
14. Павлов Е. А., Мальцев Э. В., Гушинский А. А. Интенсификация процесса вскрытия упорных промпродуктов аффинажного производства. Часть 1. Влияние механоактивации на структуру и реакционную способность металлов спутников платины и материалов, их содержащих / Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15. № 6 – 2. С. 432 – 437.
15. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. — Pori: Outokumpu research OY, 2002.
16. Хомутова Е. Г. Каталитические методы определения платиновых металлов (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 2. С. 5 – 14.

REFERENCES

1. Gerashchenko O. A., Gordoye A. N., Eremina A. K., et al. Temperature measurements: Reference book. — Kiev: Naukova Dumka, 1989. — 704 p. [in Russian].
2. Piksaikin V. M., Pshakin G. M., Roschenko V. A. Review of methods and instruments for determining undeclared nuclear materials and activities / Nauka Vseob. Bezopasn. 2006. Vol. 14. N 1. P. 49 – 72 [in Russian].
3. Alekseeva T. Yu., Karpov Yu. A., Dalnova O. A., et al. Current state and problems of analytical control of waste automotive catalysts (review) / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2017. Vol. 83. N 11. P. 5 – 14 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-11-5-14
4. Arinova A. B., Dmitrienko V. P. Main features and prospects for the development of rhodium recovery technology / Usp. Sovr. Nauki. 2019. N 1. P. 13 – 18 [in Russian].
5. Muftakhova O. S. Overview of the situation on the world market for non-ferrous metals in 2014 / Eurasian Scientific Association. 2015. Vol. 2. N 6. P. 83 – 87 [in Russian].

6. **Suoranta T., Zugazua O., Niemelä M., Perämäki P.** Recovery of palladium, platinum, rhodium and ruthenium from catalyst materials using microwave-assisted leaching and cloud point extraction / *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 154. P. 56 – 62. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.03.014
7. **Kizilaslan E., Aktas S., Sesen M. K.** Towards environmentally safe recovery of platinum from scrap automotive catalytic converters / *Turkish J. Eng. Environ. Sci.* 2009. Vol. 33. N 2. P. 83 – 90. DOI: 10.3906/muh-0901-10
8. **Al-Harashseh M., Kingman S., Bradshaw S.** The reality of non-thermal effects in microwave assisted leaching systems? / *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 84. N 1 – 2. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.03.056
9. **Jafarifar D., Daryanavard M. R., Sheibani S.** Ultra fast microwave-assisted leaching for recovery of platinum from spent catalyst / *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 78. N 3 – 4. P. 166 – 171. DOI: 10.1016/j.hydromet.2005.02.006
10. **Upadhyay A. D., Lee J., Kim, E., et al.** Leaching of platinum group metals (PGMs) from spent automotive catalysts using electro-generated chlorine in HCl solution / *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2013. Vol. 88. P. 1991 – 1999. DOI: 10.1002/jctb.4057
11. **Buslaeva T. M.** Chemistry and technology of platinum metals (lecture course). <https://doc4web.ru/uploads/files/195/85fe236baa6d7ec75f4f13bafabed9d5.docx?ysclid=1mp79jobr134259798> (accessed June 5, 2023).
12. **Njegic B., Raff J. D., Finlayson-Pitts B., et al.** Catalytic role for water in the atmospheric production of ClNO / *J. Phys. Chem. A*. 2010. Vol. 114. N 13. P. 4609 – 4618. DOI: 10.1021/jp912155a
13. **Litvintsev V. S., Melnikova T. N., Yatlukova N. G., Litvinova N. M.** Mechanical activation in ore preparation processes / *GIAB*. 2005. N S3. P. 306 – 311 [in Russian].
14. **Pavlov E. A., Maltsev E. V., Gushchinsky A. A.** Influence of mechanoactivation on the structure and reactivity of metals of platinum satellites and materials containing them / *Izd. Samar. Nauch. Ts. RAN*. 2013. Vol. 15. N 6 – 2. P. 432 – 437 [in Russian].
15. **Roine A.** Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. — Pori: Outokumpu research OY, 2002.
16. **Khomutova E. G.** Catalytic methods for the determination of platinum metals (review) / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2013. Vol. 79. N 2. P. 5 – 14 [in Russian].