

АВТОКЛАВНОЕ РАСТВОРЕНИЕ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ В СОЛЯНОКИСЛЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

© 2021 г. Н.В. Белоусова¹, О.В. Белоусов^{1,2}, Р.В. Борисов^{1,2}, А.А. Акименко²

¹ Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск, Россия

² Институт химии и химической технологии (ИХХТ) СО РАН Федерального исследовательского центра
«Красноярский научный центр» (ФИЦ КНЦ) СО РАН, г. Красноярск, Россия

Статья поступила в редакцию 05.07.21 г., доработана 13.08.21 г., подписана в печать 17.08.21 г.

Аннотация: Представлены результаты исследования особенностей процессов растворения металлических платины, родия и иридия в растворах соляной кислоты в гидротермальных автоклавных условиях. В качестве окислителя использован пероксид водорода. Твердые и жидкие фазы приводили в контакт после достижения заданной температуры, что является критически важным при изучении кинетики растворения родиевой черни и платиновой пластинки ввиду высоких скоростей этих процессов. Концентрации металлов в растворах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Формы нахождения хлорокомплексов родия, иридия и платины в растворах устанавливали спектрофотометрически. В результате экспериментов определены режимы количественного растворения платиновой пластинки и родия (в виде аффинированного порошка и пластинки) и показано, что при $t = 210^\circ\text{C}$ в среде 6М соляной кислоты с добавкой 5 об.% пероксида водорода иридий, взятый в виде аффинированного порошка, переходит в раствор на 50 % в течение более 50 ч, тогда как платиновая пластинка растворяется полностью при $t = 130^\circ\text{C}$ примерно за 120 мин. Согласно анализу кинетических данных с использованием модели сжимающегося ядра, родиевая чернь и аффинированные порошки родия и иридия растворяются в автоклавных условиях в кинетическом режиме. Полученные результаты могут применяться как в аналитической химии для количественного определения инертных платиновых металлов, так и в аффинажном производстве для усовершенствования технологии переработки сырья, содержащего металлы платиновой группы (МПГ), и оптимизации подходов к синтезу чистых хлорокомплексных соединений МПГ.

Ключевые слова: платиновые металлы, автоклавы, гидротермальные условия, растворение, солянокислые среды.

Белоусова Н.В. — докт. хим. наук, проф., зав. кафедрой металлургии цветных металлов СФУ (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79). E-mail: netmamba@mail.ru.

Белоусов О.В. — докт. хим. наук, вед. науч. сотр. лаборатории гидрометаллургических процессов ИХХТ СО РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/24), проф. кафедры металлургии цветных металлов СФУ. E-mail: ov_bel@icst.ru.

Борисов Р.В. — канд. хим. наук, науч. сотр. лаборатории гидрометаллургических процессов ИХХТ СО РАН, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых СФУ. E-mail: roma_boris@list.ru.

Акименко А.А. — аспирант лаборатории гидрометаллургических процессов ИХХТ СО РАН. E-mail: akim_aa@mail.ru.

Для цитирования: Белоусова Н.В., Белоусов О.В., Борисов Р.В., Акименко А.А. Автоклавное растворение платиновых металлов в солянокислых окислительных средах. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 5. С. 50–57. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-50-57.

Autoclave dissolution of platinum metals in hydrochloric acid oxidizing media

N.V. Belousova¹, O.V. Belousov^{1,2}, R.V. Borisov^{1,2}, A.A. Akimenko²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences of Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Received 05.07.2021, revised 13.08.2021, accepted for publication 17.08.2021

Abstract: The paper provides the results obtained in the study of the features of metallic platinum, rhodium and iridium dissolution in hydrochloric acid solutions under hydrothermal autoclave conditions. Hydrogen peroxide was used as an oxidizing agent. Solid and liquid

phases were brought into contact after reaching a predetermined temperature, which is critically important in the study of rhodium black and platinum plate dissolution kinetics due to the high rates of these processes. The concentrations of metals in solutions were determined by atomic absorption spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry. The forms of rhodium, iridium, and platinum chlorocomplexes in solutions were determined using the spectrophotometric method. As a result of the experiments, the conditions of platinum plate and rhodium quantitative dissolution (in the form of affined powder and a plate) were determined and it was shown that at 210 °C in 6M hydrochloric acid as a medium with the addition of 5 vol.% hydrogen peroxide, iridium taken in the form of affined powder went into the solution by 50 % within more than 50 h, while the platinum plate dissolved completely at 130 °C in about 120 min. Kinetic data analysis using the shrinking core model showed that rhodium black and affined rhodium and iridium powders dissolve under autoclave conditions in a kinetic mode. The results obtained can be used both in analytical chemistry for the quantitative determination of inert platinum metals and in refining production to improve the technology for processing raw materials containing platinum group metals (PGMs) and to optimize approaches to the synthesis of pure chlorocomplex compounds of PGMs.

Keywords: platinum metals, autoclaves, hydrothermal conditions, dissolution, hydrochloric acid media.

Belousova N.V. — Dr. Sci. (Chem.), prof., head of the Department of metallurgy of non-ferrous metals of the Siberian Federal University (SibFU) (660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodnyi pr., 79). E-mail: netmamba@mail.ru.

Belousov O.V. — Dr. Sci. (Chem.), leading researcher of Laboratory of hydrometallurgical processes of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICCT SB RAS) (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/24) of Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the SB RAS, prof. of the Department of metallurgy of non-ferrous metals of SibFU. E-mail: ov_bel@icct.ru.

Borisov R.V. — Cand. Sci. (Chem.), researcher of the Laboratory of hydrometallurgical processes of the ICCT SB RAS, associate prof. of the Department of mineral processing of SibFU. E-mail: roma_boris@list.ru.

Akimenko A.A. — postgraduate student of the Laboratory of hydrometallurgical processes of the ICCT SB RAS. E-mail: akim_aa@mail.ru.

For citation: Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Akimenko A.A. Autoclave dissolution of platinum metals in hydrochloric acid oxidizing media. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 50–57 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-50-57.

Введение

Будучи источником валютного резерва страны, металлы платиновой группы (МПП) помимо этого находят еще широкое практическое применение в различных высокотехнологичных областях и позволяют решать целый ряд экономических и экологических задач. Вследствие термодинамической стабильности платиновые металлы при обычных условиях устойчивы к воздействию многих реагентов, в частности различных минеральных кислот и щелочей [1]. Другой характерной особенностью МПП и их соединений является кинетическая заторможенность многих процессов с их участием.

Истощение запасов и устойчивый рост потребления благородных металлов требуют решения задач их эффективного извлечения из руд и концентратов [2–7], в том числе химически упорных, а также из вторичного сырья, основой которого выступают, главным образом, отработанные катализаторы и электронный лом [8–13]. Для этого используют пиро- и гидрометаллургические способы переработки, причем совершенствованию последних с каждым годом уделяется все больше внимания в связи с их высокой селективностью и меньшей нагрузкой на окружающую среду. Современные гидрометаллургические технологии пе-

реработки благородных металлов представлены в обзорных работах [2, 14, 15]. В контексте данной статьи особый интерес вызывает метод высокотемпературного автоклавного окисления (Platsol-процесс), который предназначен для извлечения золота и МПП из флотоконцентратов. Особенность данной технологии — использование хлорид-ионов в сернокислой среде при температурах ≤ 220 °C.

Для приготовления особо чистых растворов платиновых металлов применяют электролитические методы их растворения под действием постоянного или переменного тока в растворах минеральных кислот [16, 17]. Наиболее эффективно перевод металлов платиновой группы в раствор можно проводить при повышенных температурах и давлениях, что позволяет снять кинетические затруднения [6, 7]. Для этого используют автоклавы, применение которых не приводит к потерям и загрязнению примесями ценных металлов, позволяет интенсифицировать процессы растворения и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду [18–21]. Использование автоклавных процессов актуально не только для чистых металлов, но и для руд, содержащих благородные металлы, что активно применяется во многих компаниях [21–24].

Однако, несмотря на стремительное развитие автоклавных технологий, работы по исследованию растворения чистых металлов в автоклавных условиях немногочисленны. В то же время понимание механизма и основных факторов, влияющих на процесс растворения металлов, позволит разработать и оптимизировать существующие схемы переработки платиносодержащего сырья.

Несомненна большая роль автоклавных технологий в пробоподготовке упорного сырья для последующего аналитического определения МПГ. Эффективность переработки металлсодержащего сырья, выбор схемы извлечения ценных компонентов, выявление причин изменения эксплуатационных свойств используемых материалов во многом определяются уровнем аналитического сопровождения работ. Современные высокочувствительные физико-химические методы анализа позволяют определять в широком интервале концентраций ценные компоненты в объектах металлургического производства. Применение этих методов требует разработки экспрессных методов разложения анализируемых материалов с получением устойчивых растворов с низким солевым фоном. В работах [21, 25, 26] показано, что разложение проб, содержащих металлические родий и иридий, наиболее эффективно проводить в закрытых системах при температурах около 200 °С в растворах соляной кислоты с добавками окислителей — азотной кислоты, диоксида марганца или хлората калия.

Таким образом, определение оптимальных условий количественного растворения инертных платиновых металлов в гидротермальных условиях (температура, окислитель, продолжительность процесса) представляет практический интерес для разработки аналитических методов их определения и совершенствования процессов выщелачивания из упорных руд, концентратов и вторичного сырья.

Цель настоящего исследования заключалась в установлении параметров растворения металлических платины, родия и иридия в растворах хлороводородной кислоты с добавками пероксида водорода в закрытых системах при повышенных температурах.

Методика исследований

В данной работе использовали: воду дистиллированную (ГОСТ Р 58144-2018); HCl — «ОСЧ 20-4» (ГОСТ 14261-77); H₂O₂ (ГОСТ 177-88); родиевую

чернь, синтезированную по методике [27]; аффинированный родий (ГОСТ 12342-2015); аффинированный иридий (ГОСТ 12338-2020); пластину родиевую толщиной 0,15 мм (доля родия не менее 99,9 мас.%); пластину платины (ГСО 11082-2018—11085-2018) толщиной 0,10 мм (доля платины не менее 99,9 мас.%).

Электронно-микроскопический анализ, подтвердивший наличие чистых аффинированных порошков родия и иридия (рис. 1), проводили на сканирующем электронном микроскопе ТМ4000 (Hitachi, Япония) с системой микроанализа «Quantax 70» (Bruker, Германия).

Удельную поверхность родиевой черни определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с помощью анализатора ASAP-2420 (Micromeritics, USA) при температуре 77 К.

Методом газовой адсорбции установлено, что удельная поверхность черни родия составила 5 м²/г, а размеры частиц, согласно данным электронной микроскопии, — около 0,1 мкм. Усредненный размер частиц аффинированного порошка родия, который был использован в настоящей работе, составляет 100 мкм, что соответствует удельной поверхности 0,005 м²/г. Рассчитанная удельная площадь родиевой пластинки — 0,001 м²/г.

Усредненный размер частиц аффинированного порошка иридия составляет 80 мкм, что приблизительно соответствует удельной поверхности 0,003 м²/г.

Эксперименты по растворению металлов осуществляли в кварцевых автоклавах объемом от 20 до 30 см³, конструкция которых описана в работах [26, 27]. В кварцевый автоклав помещали металл (в виде порошка или пластинки) в количестве 100 мг, заливали 10 мл соляной кислоты, вводили 0,5 мл пероксида водорода. Кварцевый реактор закрывали фторопластовой крышкой, фиксировали в титановом кожухе [27]. Автоклав нагревали в термостате до заданной температуры при постоянном перемешивании в вертикальной плоскости. В ходе растворения наблюдали изменение окраски раствора. По истечении заданного времени автоклав доставали и охлаждали. Осадок отделяли от раствора, многократно промывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на хлорид-ион, высушивали до постоянной массы и взвешивали. Концентрации металлов в растворах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии — «AAnalyst-400» (PerkinElmer, США) и масс-спектрометрии с ин-

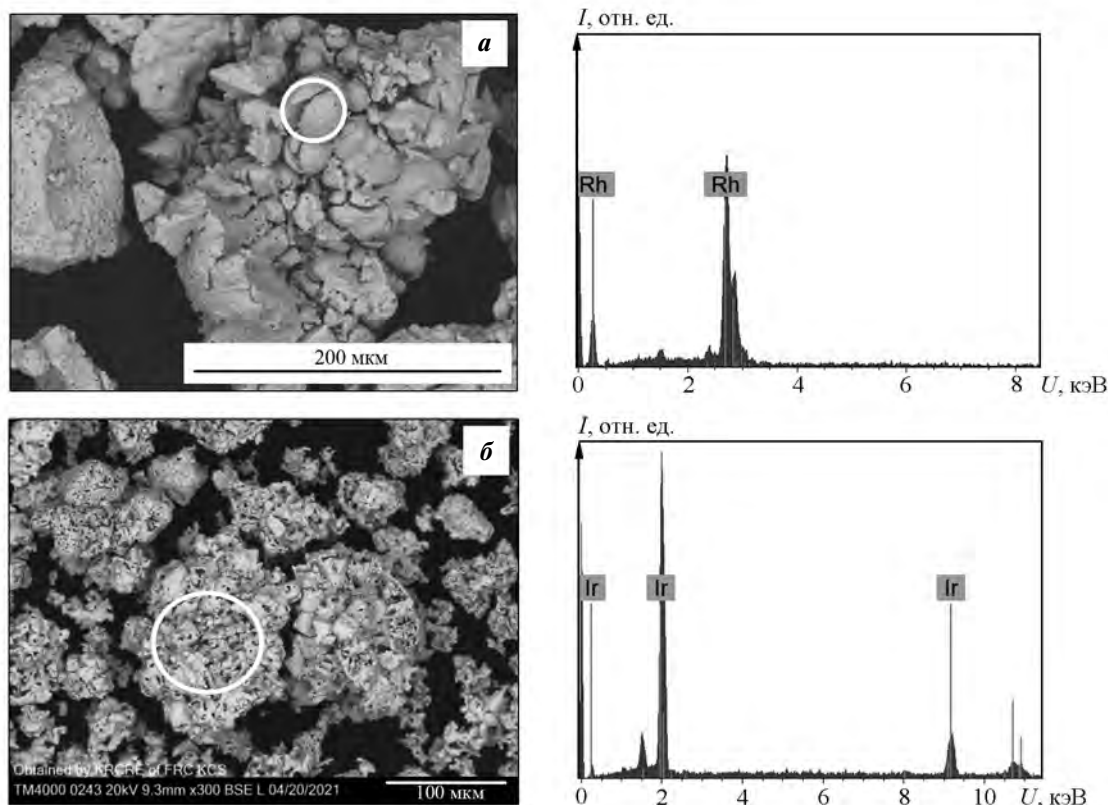


Рис. 1. СЭМ-изображение исходных аффинированных порошков и энергодисперсионный спектр по отображаемой области

a – родий; *б* – иридий

Fig. 1. SEM image of initial affined powders and energy-dispersive spectrum on the area displayed

a – rhodium; *б* – iridium

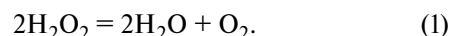
дуктивно связанной плазмой — ICP-MS 7500a (Agilent, США).

Формы нахождения хлорокомплексов родия, иридия и платины в растворах определяли спектрофотометрически. Съемку электронных спектров поглощения проводили на спектрофотометре «AvaSpec 2048L» (Avantes, Нидерланды) в диапазоне длин волн 190–700 нм.

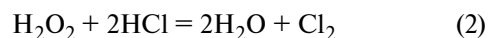
Конструкция автоклавов позволяет проводить эксперименты с разделением фаз, когда твердая фаза помещается в стаканчик, закрепленный в верхней части автоклава, а в кварцевый реактор заливаются жидкие реагенты. В данном случае смешение фаз осуществляли путем включения перемешивания после прогрева системы до требуемой температуры. При изучении кинетики растворения родиевой черни и платиновой пластинки такое условие приведения в контакт реагирующих компонентов является обязательным ввиду высокой скорости этих процессов.

Результаты исследования и их обсуждение

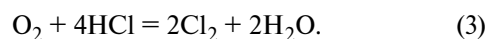
Наиболее приемлемыми окислителями для растворения платиновых металлов являются кислород и хлор. Их ввод в автоклав можно осуществлять непосредственно в газообразном состоянии, если это предусмотрено конструкцией ректора. Другой способ ввода — выделение газообразного продукта в результате химической реакции, например разложения пероксида водорода:



Образование хлора идет в результате протекания процесса

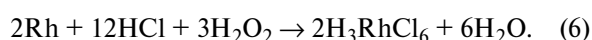
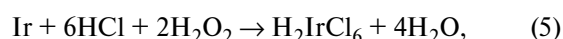


и при непосредственном вводе газообразного кислорода в систему:



При температурах до 150 °С, согласно термодинамическим расчетам, равновесие реакции (3) смещено в сторону исходных веществ, а свыше 150 °С — в сторону газообразного хлора.

Процессы окисления металлических платины, родия, иридия в растворах соляной кислоты в присутствии окислителя термодинамически разрешены. В случае использования пероксида водорода соответствующие реакции можно представить следующими уравнениями:



Электронные спектры поглощения растворов, полученных после растворения платины, иридия и родия, отвечают, соответственно, следующим комплексным формам: $[\text{PtCl}_6]^{2-}$, $[\text{IrCl}_6]^{2-}$, $[\text{RhCl}_6]^{3-}$.

В таблице приведены результаты расчетов изменения энергии Гиббса для реакции (4), которые подтверждают высокую термодинамическую вероятность протекания этого процесса. Для реакций (5) и (6) расчеты проведены не были в связи с отсутствием достоверных данных по энтропиям и теплоемкостям гексахлоро родиата (III) водорода и гексахлороиридата (IV) водорода, однако, с учетом значений стандартных окислительно-восстановительных потенциалов соответствующих пар [1], следует полагать, что изменения энергии Гиббса при растворении родия или иридия имеют тот же порядок величины. Для родия, как менее благородного металла, значения ΔG^0 должны быть более отрицательными.

В то же время, как показывает практика, поведение платиновых металлов в растворах характеризуется серьезными кинетическими затруднениями.

Термодинамические характеристики реакции (4)

Thermodynamic data of reaction (4)

T, K	$\Delta H^0, \text{кДж}$	$\Delta S^0, \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$	$\Delta G^0, \text{кДж}$
300	–374,5	86,4	–400,4
330	–389,8	37,8	–402,3
360	–405,1	–6,6	–402,8
390	–421,6	–50,6	–401,9
420	–440,3	–96,6	–400,0

ами, причем химическая стойкость по отношению к кислотам и окислителям увеличивается в последовательности Pt — Rh — Ir. При этом реакционная способность конкретного металла определяется его степенью дисперсности: у черной она наибольшая, далее идут порошки и губка, а наименее активны компактные материалы.

Как отмечено выше, в данной работе в виде черни был взят только родий, но в области умеренных температур даже он практически не растворяется. При $t = 190$ °С количественное растворение родиевой черни достигается за $\tau = 60$ мин (рис. 2, а).

При этой температуре родиевая пластинка инертна, и за 240 мин в раствор переходит менее 1 % родия. Увеличение температуры до 200 °С позволяет растворить до 6 % родия за 600 мин, а при $t = 210$ °С достигается практически полный пере-

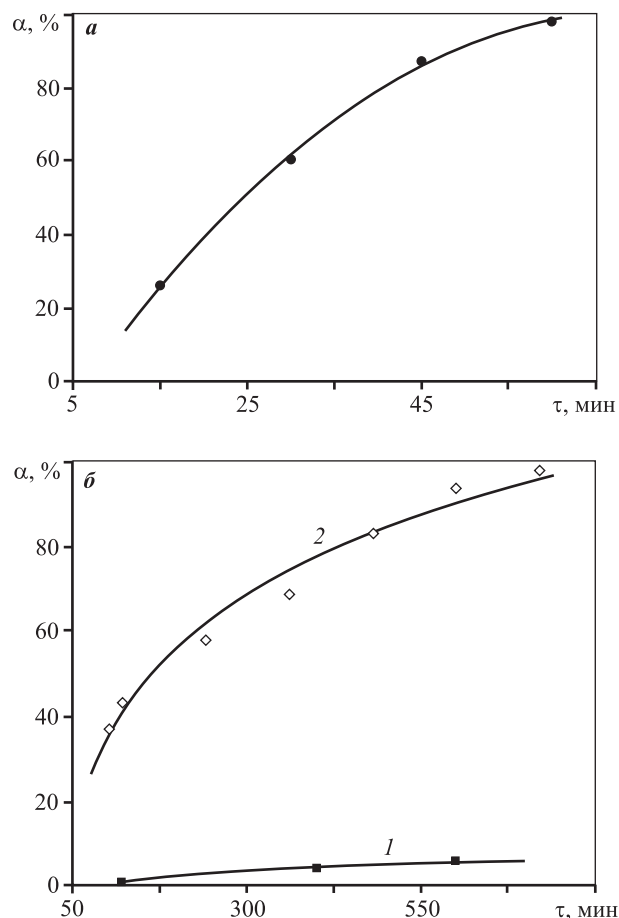


Рис. 2. Зависимость степени растворения родия в среде 6М HCl + 5 об.% H₂O₂ от времени процесса
а — чернь, $t = 190$ °С; б — пластинка, $t = 200$ °С (1) и 210 °С (2)

Fig. 2. Dependence of the degree of rhodium dissolution in the 6M HCl + 5 vol.% H₂O₂ medium on process time
а — black, $t = 190$ °С; б — plate, $t = 200$ °С (1) and 210 °С (2)

ход его в раствор (рис. 2, б). Отметим, что аффинированный родий растворяется количественно при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ примерно за 240 мин.

Платина — наименее инертный из изучаемых в работе металлов, однако в открытой системе для достижения количественного растворения пластинки в смеси соляной и азотной кислот необходимы температурное воздействие и достаточно продолжительное время. В автоклаве платиновая пластинка достаточно быстро растворяется даже при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3): в растворе 6М соляной кислоты с добавкой пероксида водорода (уравнение (4)) за $\tau = 240$ мин в раствор перешло ~86 % платины. При увеличении температуры до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ для количественного растворения достаточно около 120 мин.

В работе [26] показано, что иридий даже в виде черни с поверхностью $1\text{ м}^2/\text{г}$ является достаточно инертным материалом при $t < 195\text{ }^{\circ}\text{C}$, а аффинированный иридий нерастворим в данных условиях. В связи с этим изучение процессов растворения аффинированного иридия, как и родия, проводили при более высоких температурах. На рис. 4 приведены кинетические зависимости перехода аффинированного иридия в раствор. Для его заметного растворения требуется значительный подъем температуры (до $210\text{ }^{\circ}\text{C}$) и продолжительное время вскрытия (>50 ч).

Для анализа кинетических данных по растворению (выщелачиванию) часто используют модель

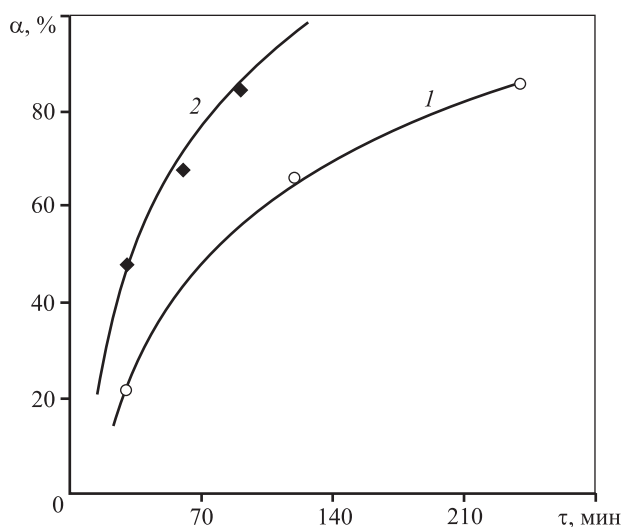


Рис. 3. Зависимость степени растворения платиновой пластинки в среде 6М HCl + 5 об.% H₂O₂ от времени при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) и $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

Fig. 3. Dependence of the degree of platinum plate dissolution in the 6M HCl + 5 vol.% H₂O₂ medium on time at $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) and $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

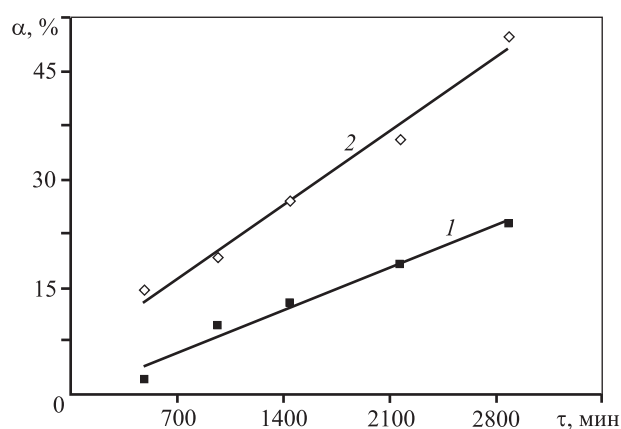


Рис. 4. Зависимость степени растворения аффинированного иридия в среде 6М HCl + 5 об.% H₂O₂ от времени при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) и $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

Fig. 4. Dependence of the degree of refined iridium dissolution in the 6M HCl + 5 vol.% H₂O₂ medium on time at $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) and $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

сжимающегося ядра [28–31], согласно которой процессы с участием частиц сферической формы, протекающие в кинетическом режиме, описываются уравнением

$$k_c \tau = 1 - (1 - x)^{1/3}, \quad (7)$$

в смешанном режиме —

$$k_m \tau = \frac{1}{3} \ln(1 - x) + (1 - x)^{-1/3} - 1, \quad (8)$$

а в случае затруднения диффузии через слой твердых продуктов

$$k_d \tau = 1 - \frac{2}{3}x - (1 - x)^{2/3}. \quad (9)$$

Если лимитирующей стадией является пленочная диффузия, то для мелких и крупных частиц используются, соответственно, уравнения (10) и (11) [29]:

$$k_{fs} \tau = 1 - (1 - x)^{2/3}, \quad (10)$$

$$k_{fl} \tau = 1 - (1 - x)^{1/2}. \quad (11)$$

В уравнениях (7)–(11) k_c , k_m , k_d , k_{fs} , k_{fl} — соответствующие константы скоростей; x — степень превращения (растворения) металла.

Поскольку в нашем случае нерастворимые продукты в поверхностных слоях не образовывались, уравнение (9) в расчет не принимали.

Обработка полученных данных показала, что кинетика растворения родиевой черни и аффини-

рованных порошков родия и иридия лучше всего описывается уравнением (7), что свидетельствует о кинетическом режиме протекания процессов. Критерием соответствия уравнения экспериментальным данным служило значение коэффициента корреляции (R^2) прямой, построенной в линейных координатах. В случае аффинированного порошка иридия при обеих температурах (200 и 210 °С) значение R^2 для функциональных зависимостей $1 - (1 - x)^{1/3} = f(t)$ составило 0,99; для черни и аффинированного порошка родия коэффициент корреляции оказался в диапазоне 0,96–0,98. Что касается остальных режимов, анализ уравнений (8), (10), (11) показал, что R^2 лежит в интервале от 0,53 до 0,90.

Заключение

В данной работе были определены параметры растворения компактных платины и родия. Платиновая пластинка количественно растворяется в 6М соляной кислоте с добавкой 5 об.% пероксида водорода при $t = 130$ °С и $\tau = 2$ ч. Для растворения родиевой пластинки не менее чем на 98 % в такой же реакционной среде необходимы температура 210 °С и время 12 ч.

Иридий, взятый в виде аффинированного порошка, в среде 6М соляной кислоты с добавкой 5 об.% пероксида водорода при $t = 210$ °С переходит в раствор на 50 % в течение более 50 ч.

Установлено, что родиевая чернь и аффинированные порошки родия и иридия растворяются в автоклавных условиях в кинетическом режиме.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект 0287-2021-0014) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Acknowledgments: *The research was conducted under the government task of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the RAS (Project 0287-2021-0014) using the Krasnoyarsk regional common use center equipment of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Research Center» of the Siberian Branch of the RAS.*

Литература/References

1. Буслаева Т.М., Симанова С.А. Состояние платиновых металлов в солянокислых и хлоридных водных растворах. Палладий, платина, родий, иридий. *Коорд. химия*. 1999. Т. 25. No. 3. С. 165–176.
2. Mpinga C.N., Eksteen J.J., Aldrich C., Dyer L. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review. *Miner. Eng.* 2015. No. 78. P. 93–113. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.04.015>.
3. Sahu P., Jena M.S., Mandre N.R., Venugopal R. Platinum group elements mineralogy, beneficiation, and extraction practices — An overview. *Miner. Process. Extract. Metall. Rev.* 2020. P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1795848>.
4. Göknelma M., Birich A., Stopic S., Friedrich B. A review on alternative gold recovery re-agents to cyanide. *J. Mater. Sci. Chem. Eng.* 2016. Vol. 4. No. 8. P. 8–17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>.
5. Yu L., Li S., Liu Q., Deng J., Luo B., Liang Yu., Zhao L., Lai H. Gold recovery from refractory gold concentrates by pressure oxidation pre-treatment and thio-sulfate leaching. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2019. Vol. 55. No. 2. P. 537–551. <https://doi.org/10.5277/ppmp18166>.
6. Zaytsev P.V., Fomenko I.V., Chugaev L.V., Shneerson Ya.M. Pressure oxidation of double refractory raw materials in the presence of limestone. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 8. P. 41–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.08.05>.
7. Simmon G.L., Baughman D.R., Gathje J.C., Oberg K.C. Pressure oxidation problems and solutions: treating carbonaceous gold ores containing trace amounts of chlorine (halogens). *Min. Eng.* 1998. Vol. 50. No. 1. P. 69–73.
8. Ding Y., Zhang S., Liu B., Zheng H., Chang C. C., Ekberg C. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. *Resources, Conserv., Recycl.* 2019. Vol. 141. P. 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.041>.
9. Islam A., Ahmed T., Awual M.R., Rahman A., Sultana M., Abd Aziz A., Hasan M. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste—A review. *J. Clean. Product.* 2020. Vol. 244. Art. 118815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118815>.
10. Salman K., Yen-Peng T. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: A review on conventional approaches and bio-processes. *Resources, Conserv., Recycl.* 2021. Vol. 170. Art. 105558. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105558>.
11. Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V., Pavlov E.A., Varyukhin, D.Y. Recovery of noble metals from spent catalysts: A review. *Metall. Mater. Trans. B.* 2020. Vol. 51. No. 5. P. 2413–2435. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01913-w>.

12. Oraby E.A., Li H., Eksteen J.J. An alkaline glycine-based leach process of base and precious metals from powdered waste printed circuit boards. *Waste Biomass Valoriz.* 2020. Vol. 11. No. 8. P. 3897—3909. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00780-0>.
13. Batnasan A., Haga K., Shibayama A. Recovery of precious and base metals from waste printed circuit boards using a sequential leaching procedure. *JOM.* 2018. Vol. 70. No. 2. P. 124—128. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2694-y>.
14. Miller J.D., Wan R.Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. In: *Gold ore processing*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2016. P. 885—907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>.
15. Liu G., Wu Y., Tang A., Li B. Recovery of scattered and precious metals from copper anode slime by hydrometallurgy: A review. *Hydrometallurgy.* 2020. Vol. 197. Art. 105460. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105460>.
16. Upadhyay A., Lee J.-C., Kim E., Kim M.S., Kim B.S., Kumar V. Leaching of platinum group metals (PGMs) from spent automotive catalyst using electro-generated chlorine in HCl solution. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2013. Vol. 88. P. 1991—1999. <https://doi.org/10.1002/jctb.4057>.
17. Lobko S.V., Kuzas E.A., Naboychenko S.S., Voinov V.N. Electrochlorination of secondary raw materials containing precious metals using a volumetric current supply. *Tsvetnye Metally.* 2017. No. 3. P. 45—49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.03.07>.
18. Belousov O.V., Belousova N.V., Borisov R.V., Ryumin A.I. Extraction of trace elements from platinum group metal concentrates in hydrothermal conditions. *Tsvetnye Metally.* 2021. No. 6. P. 23—30. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.06.03>.
19. Belousov O.V., Ryumin A.I., Belousova N.V., Borisov R.V., Grizan N.V., Lobanova O.N. Leaching of impurities from poor intermediate products of refining production in autoclave conditions. *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. Vol. 93. No. 7. P. 1054—1058. <https://doi.org/10.1134/S1070427220070162>.
20. Xingxiang F., Yunan Y., Lin T., Yongjia L., Sen Y., Songyuan Z., Zhihong Y., Ni Y., Fabin Z. Kinetics research on rhenium of the waste platinum-rhenium catalyst under pressure oxygen leaching. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 439. No. 2. Art. 022009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/2/022009>.
21. Hodgson A.P.J., Jarvis K.E., Grimes R.W., Marsden O.J. Development of an iridium dissolution method for the evaluation of potential radiological device materials. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2016. Vol. 307. No. 3. P. 2181—2186. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4381-1>.
22. Mohanty U.S., Kalliomäki T., Seisko S., Peng C., Rintala L., Halli P., Aroma J., Taskinen P., Lundström M. Dissolution of copper and nickel from nickel-rich anode slimes under oxidized pressure leaching. *Miner. Process. Extract. Metall.* 2019. P. 1—10. <https://doi.org/10.1080/25726641.2019.1670008>.
23. Yang Y., Gao W., Xu B., Li Q., Jiang T. Study on oxygen pressure thiosulfate leaching of gold without the catalysis of copper and ammonia. *Hydrometallurgy.* 2019. Vol. 187. P. 71—80. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.006>.
24. Ubaldini S. Leaching kinetics of valuable metals. *Metals.* 2021. Vol. 11. No. 1. P. 173. <https://doi.org/10.3390/met11010173>.
25. Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Grizan N.V. Specific features of dissolution of metallic rhodium in acid oxidative media under hydrothermal conditions. *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. Vol. 92. No. 8. P. 1102—1106. <https://doi.org/10.1134/S107042721908007X>.
26. Borisov R.V., Belousov O.V., Dorokhova L.I., Zhizhaev A.M. Features of fine iridium powders dissolution in acidic media. *J. Sib. Federal Univ. Chemistry.* 2017. Vol. 3. No. 10. P. 325—332. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0029>.
27. Борисов Р.В., Белоусов О.В., Иртыго Л.А. Термостимулированные превращения высокодисперсных порошков металлов платиновой группы в атмосфере аргона. *Журн. физ. химии.* 2014. Т. 88. No. 10. С. 1542—1548.
28. Borisov R.V., Belousov O.V., Irtygo L.A. Thermostimulated transformations of highly disperse powders of platinum group metals in an argon atmosphere. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2014. Vol. 88. No. 10. P. 1732—1738. <https://doi.org/10.1134/S0036024414100069>.
29. Levenspiel O. Chemical reaction engineering. 2nd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, 1972.
30. Hidalgo T., Kuharb L., Beinlich A., Putnisa A. Kinetics and mineralogical analysis of copper dissolution from a bornite/chalcopyrite composite sample in ferric-chloride and methanesulfonic-acid solutions. *Hydrometallurgy.* 2019. Vol. 188. P. 140—156. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.06.009>.
31. Li M., Wei Ch., Qiu Sh., Zhou X., Li C., Deng Zh. Kinetics of vanadium dissolution from black shale in pressure acid leaching. *Hydrometallurgy.* 2010. Vol. 104. P. 193—200. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.001>.
32. Ju Zh.-J., Wang Ch.-Y., Yin F. Dissolution kinetics of vanadium from black shale by activated sulfuric acid leaching in atmosphere pressure. *Int. J. Min. Process.* 2015. Vol. 138. P. 1—5. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.03.005>.