

УДК 661.094.56  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/33>

**Шкода В.О.**

Дніпровський державний технічний університет

**Кравченко О.В.**

Дніпровський державний технічний університет

**Гуляєв В.М.**

Дніпровський державний технічний університет

**Коваленко А.Л.**

Дніпровський державний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ПЛАТИНИ З ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ВИРОБНИЦТВА НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Для технології виробництва нітратної кислоти при каталітичному окисленні амоніаку киснем повітря в основному застосовують платиноїдні каталізатори. У процесі їх використання відбувається зниження ефективності дії, що пов'язано з відкладенням на каталізаторі осадів. Для відновлення ефективності застосовують різні способи регенерації відпрацьованих каталізаторів. У даній роботі досліджено умови вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів шляхом вилугування нітратною кислотою. Встановлено, що для досягнення вилучення платини на рівні 98% і більше достатньо підтримувати окисно-відновний потенціал (ОВП) у пульпі на рівні 780–840 мВ відносно хлорсрібного електрода порівняння, що уникає непродуктивних витрат реагентів та зниження вилучення ренію. Експерименти проведено з платиновим каталізатором R-56 (0,3% Pt), включаючи обпалення при 700 °С та 1250 °С, двостадійне вилугування в 3 М нітратній кислоті при 90–95 °С з подальшою фільтрацією та аналізом. Додатково розглянуто каталізатори на основі дорогоцінних металів, нанесених тонким шаром (наприклад, для очищення вихлопних газів автомобілів з вмістом 0,1–0,4% металів), де хімічні методи вилучення є витратними. Розроблено механічний процес: подрібнення в кульовій або молотковій млині до розмірів частинок <35 мкм або через сито 16 мкм з мокрою сепарацією. У прикладах досягнуто вилучення 88,5–90% Pt та 89,1–89,3% Rh у концентраті, що становить 27% від маси вихідного матеріалу. Робота пропонує ефективні методи переробки відпрацьованих каталізаторів для оптимізації ресурсів та зменшення екологічного впливу. Результати дослідження відносяться до способів вилучення металів платинової групи і ренію з дезактивованих (відпрацьованих) каталізаторів, і можуть бути використані при переробці вторинної сировини. Отримані результати дозволяють оптимізувати витрати ресурсів, підвищити ефективність вилучення платинових металів і можуть бути використані у промисловості при переробці відпрацьованих каталізаторів для зменшення екологічного навантаження та економії сировини.

**Ключові слова:** платина, каталізатор, вилугування, подрібнення, селективність, регенерація.

**Постановка проблеми.** Метали платинової групи (PGM, Platinum Group Metals), такі як платина (Pt), паладій (Pd) та родій (Rh), є критичними сировинними матеріалами, які широко використовуються в каталізаторах для очищення вихлопних газів, а також у технологіях декарбонізації, таких як паливні елементи, електролізери та процеси утилізації CO<sub>2</sub>. Зростаючий попит на PGM зумовлений жорсткими екологічними стандартами

(наприклад, Euro 6, RDE, WLTP) та глобальними цілями вуглецевої нейтральності до 2050 року. Міжнародний ринок автомобільних каталізаторів оцінювався в 12,45 млрд дол. США у 2022 році та прогнозується на зростання до 18,98 млрд дол. до 2030 року. Видобуток PGM з руд є енергоємним і екологічно шкідливим процесом, що призводить до значних викидів парникових газів, забруднення води та ґрунту: вміст PGM у рудах становить лише

2–10 г/т, тоді як у відпрацьованих автомобільних каталізаторах (SACs) – 2000–15000 г/т [1, с. 6843].

Проблема загострюється через обмеженість постачання PGM, які визнані критичною сировиною в ЄС та стратегічними в США. За оцінками, відпрацьовані каталізатори забезпечують понад 57% постачання PGM в Європі, роблячи їх ключовим вторинним ресурсом. Однак традиційні методи переробки, такі як пірометалургія, є енергоємними (температури 1500–2000 °С) та генерують токсичні відходи. Гідрометалургія часто вимагає агресивних реагентів (ціаніди), що ускладнює екологічну безпеку. Директиви ЄС, такі як ELV 2000/53/EC, вимагають 95% рівня переробки, але поточні показники рециклінгу (наприклад, 43,21% для Pt у 2022 році) недостатні. Таким чином, актуальною є розробка ефективних, екологічно чистих методів вилучення PGM з SACs для забезпечення стійкого ланцюга постачання та зменшення залежності від первинної видобутку [2, с. 100868].

Платина та інші метали платинової групи (МПП) є критично важливими компонентами каталізаторів для конверсії аміаку в технології виробництва нітратної кислоти. В умовах інтенсивної експлуатації каталізатори втрачають активність через термічні впливи, осадження продуктів побічних реакцій та дію отруйних домішок, що зумовлює необхідність їх регенерації або переробки й повернення дорогоцінного металу у виробничий цикл. В українському науковому середовищі проблема економного вилучення платини з відпрацьованих матеріалів розглядається як актуальна з техніко-економічного та екологічного поглядів [3, с. 5].

У вітчизняних роботах розглядаються два основні підходи: хлорування з подальшим розчиненням хлоросполук платини, а також гідрометалургійні методи – кислотне й лужне вилуговування з подальшою обробкою шламів і концентратів [3, с. 6]. Згідно до хлорного методу, відпрацьований каталізатор піддають прокалюванню, а потім хлоруванню при високих температурах із застосуванням хлоридних або органохлорних агентів ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{COCl}_2$ ), після чого утворені леткі сполуки абсорбуються й з них відновлюють метал хімічними відновниками. Недоліком є висока енергоємність операцій і корозійна агресивність середовища.

Гідрометалургійні методи передбачають або розчинення носія ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) з наступним концентруванням МПП, або селективне виокремлення компонентів із шламу кислотними/лужними розчинами [4, с. 235]. Кислотне вилуговування за

участю  $\text{HCl}$  або  $\text{H}_2\text{SO}_4$  зазвичай проводять після попереднього прокалювання ( $>800$  °С) для видалення органічних домішок; реакції іноді виконують при підвищених температурах і тисках (до 100–140 °С, до 5,0 МПа) для підвищення ступеня вилучення. Лужні схеми включають плавлення шихти з  $\text{NaOH}$  і подальше вилуговування. Останній варіант дозволяє ефективно розчинити деякі форми металу, але створює проблему переробки алюмінатних стічних вод.

Практика демонструє, що багатоступенева технологія (обпал, плавлення, вилуговування, сепарація, відновлення) призводить до значних енергетичних витрат і технологічних втрат платини (3–5%). Частою проблемою є також ускладнення фільтраційних операцій при кислотному розчиненні  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у  $\gamma$ -формі, а також необхідність утилізації або переробки агресивних розчинів (сульфатні, хлоридні, алюмінатні стоки) [5, с. 13]. Ці аспекти підкреслюються як ключові бар'єри для широкомасштабного застосування існуючих методик.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Останні дослідження фокусуються на переході від традиційних методів до зелених технологій вилучення PGM, з акцентом на зменшення енергоспоживання, токсичних відходів та витрат. Комплексні огляди підкреслюють тенденції до інтеграції зеленої хімії в рециклінг, включаючи біометалургію, механохімію, іонні рідини та глибокі евтектичні розчинники (DES). Ці підходи дозволяють досягати високих рівнів вилучення (90–99%) з мінімальним впливом на довкілля [6, с. 119157].

У пірометалургії застосовується плавлення з флюсами (наприклад,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) та колекторами (Fe, Cu) для формування сплавів PGM, з вилученням  $>99\%$ , але з високим енергоспоживанням та токсичними викидами. Хлорування ( $\text{Cl}_2/\text{CO}$  при 550 °С) досягає 92,9–95,9% вилучення, але обладнання страждає від корозії. Гідрометалургія, як описано в огляді [7, с. 106222], домінує завдяки прямому вилуговуванню, використовуючи  $\text{HCl}$  з окиснювачами ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaClO}$ ) для рекуперації  $\sim 100\%$  Pd, 92% Pt та 61% Rh при м'яких умовах (70 °С, 2 год). Допоміжні методи, як мікрохвильове або ультразвукове вилуговування, покращують кінетику (наприклад, 99,74% Pd за 60 хв з  $\text{NaClO}_3$ ).

Зелені альтернативи набирають популярності. Біометалургія використовує мікроорганізми (*Pseudomonas fluorescens*) для біогенних процесів, досягаючи  $>95\%$  Pt/Pd без токсичних газів, з перевагами в низькій вартості, але з повільними тем-

пами. Механохімія (кульове подрібнення) активує матеріал з 93,42% вилученням PGM після HCl-вилуговування. Іонні фосфонієві рідини забезпечують селективне вилучення Pd/Pt/Rh.

Недавні дослідження пропонують вилучення з використанням солей літію ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , LiF) та HCl, з кальцинацією при 800 °C та вилуговуванням при 180 °C для 104,2% Pt, 94,9% Rh та 97,5% Pd, уникаючи токсичних окиснювачів. Інші інновації включають мікрохвильове плавлення (98,59% Pt) та електрогенероване хлорування (99,6% Pt) [8, с. 90]. Загалом, перспективи спрямовані на гібридні підходи для закриття циклу PGM, з акцентом на пряме використання вилучених металів у нових каталізаторах для зменшення екологічного навантаження та забезпечення стійкості.

Серед розробок українських науковців та інженерів запропоновані варіанти, спрямовані на зниження температури та кількості стадій обробки, зменшення обсягів застосовуваних кислот і підвищення селективності вилучення. Наприклад, у деяких роботах розглядаються способи відновлення активності платиноїдних сіток за допомогою низькотемпературної хлор-повітряної обробки з подальшим прокалюванням, що дозволяє зменшити корозійний вплив і потребу в дорогих корозійностійких матеріалах апаратури [9, с. 150]. Також розробляються електрохімічні методи реставрації покриттів та осадження платини на поверхню елементів, що потенційно можуть знизити потребу у повному вилученні металу з матриці.

Новітні дослідження наголошують на необхідності комплексного підходу, що поєднує технічну ефективність з екологічною безпекою: контроль емісій при прокалюванні й хлоруванні, очищення стічних розчинів після вилуговування, утилізація відходів і енергоефективність процесів [10, с. 6719]. Техніко-економічні оцінки показують, що оптимізація режимів обробки й впровадження регенеративних операцій може знизити сукупні витрати та збільшити віддачу від повернення платини у виробництво.

Українська наука і технологія володіють значним потенціалом у сфері рекуперації платини з відпрацьованих каталізаторів нітратної кислоти. Існуючі методи (хлорування, кислотне та лужне вилуговування, електрохімічна реставрація) мають як переваги, так і суттєві обмеження, пов'язані з енергоємністю, технічною складністю й екологічними ризиками. Подальша робота повинна бути спрямована на розробку енергоефективних технологічних схем, що забезпечать мінімі-

зацію втрат дорогоцінного металу та зменшення впливу на навколишнє середовище. Зокрема, перспективними є низькотемпературні методи обробки, селективні сорбційні технології та електрохімічні підходи, які потребують подальшої дослідно-конструкторської й пілотної перевірки.

На основі аналізу відомих робіт, для підвищення ефективності рекуперації платини доцільно зосередитись на:

- створенні універсальних схем, сумісних з різними модифікаціями носія ( $\alpha$ - та  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [11, с. 30];
- розробці низькотемпературних і енергоефективних методів розкладання [12, с. 2895];
- впровадженні селективних сорбційно-сольвентних операцій для попереднього концентрування МПГ [13, с. 235];
- мінімізації утворення токсичних і корозійних продуктів при хлоруванні [14, с. 100112];
- масштабуванні електрохімічних та відновних технологій для промислового застосування [15, с. 140];
- комплексному оцінюванні життєвого циклу технологій з урахуванням екологічних витрат.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – підвищення ефективності рекуперації платини з відпрацьованих каталізаторів.

**Виклад основного матеріалу.** Як показала практика, для досягнення вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів на рівні 98% і більше, під час проведення операцій вилуговування та відмивання нерозчинного залишку, немає необхідності проводити обробку окиснювачем до значення окисно-відновного потенціалу (ОВП) понад 850 мВ. Обробку нітратною кислотою слід проводити до встановлення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння, рівного 780–840 мВ. За таких значень досягається необхідна повнота вилучення платини в розчин. За меншого значення ОВП знижується вилучення платини в розчин. Проведення обробки до значення ОВП понад 840 мВ практично не збільшує вилучення платини в розчин, а призводить до непродуктивної витрати нітратної кислоти та зниження вилучення ренію з розчинів після виділення платини.

Роботу проводили з платиновим каталізатором R-56, що містив платину в кількості 0,3 %. Наважку каталізатора масою 50 г обпалювали в трубчастій печі спочатку при температурі 700 °C, а потім при температурі 1200 °C. Потім огарок розпулювали в 150 см<sup>3</sup> 3 М нітратної кислоти, при перемішуванні нагрівали до температури 90–95 °C

і обробляли нітратною кислотою до встановлення заданого значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння. Пульпу перемішували при заданій температурі протягом 30–40 хвилин, охолоджували та фільтрували. Осад повторно розпульповували в 150 см<sup>3</sup> 3 М нітратної кислоти, при перемішуванні обробляли нітратною кислотою до встановлення заданого значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння, пульпу перемішували протягом 30–40 хвилин і відфільтровували осад. Основний розчин і розчин промивки доводили до об'єму 150 см<sup>3</sup> та аналізували. Результати представлені на рис. 1.

При використанні каталізаторів на основі дорогіших або платинових металів метали на носії можуть бути нанесені методом покриття тонким шаром. Зазвичай у каталізаторі кількість металу становить відносно незначну частину. Наприклад, у каталізаторах для очищення вихлопних газів автомобілів вміст металів становить 0,1–0,4% від загальної маси каталізатора. Виділення металів, що знаходяться на носії в настільки низьких концентраціях хімічними методами, наприклад кислотним вилуговуванням, вимагає дуже високих витрат, зумовлених розмірами установки та кількостями використовуваних реагентів.

Один із методів нанесення металу на каталізатор включає покриття носія кордієриту тонким шаром алюміній оксиду, імпрегнованого або послідовно покритого шарами платинових металів або сплавів, наприклад платини, родію або сплавів.

У цій роботі розроблено процес вилучення металів з каталізатора, в якому метали нанесені шляхом

покриття тонким шаром. Для цього зразок відпрацьованого каталізатора для очищення вихлопних газів автомобілів масою 6 г, який номінально містить 0,85% Pt і 0,03% Rh, подрібнювали в кульовій млині до тих пір, поки 50% частинок не мали розмір <35 мкм. Подрібнений матеріал піддавали обробці в мокрому сепараторі. Маса отриманого концентрату склала 27,1%, а маса відходів 72,9% від маси вихідного матеріалу. Концентрат містив 1,05% Pt і 0,04% Rh, а відходи – 0,04% Pt і 0,002% Rh. Таким чином, було вилучено 90% Pt і 89,1% Rh.

У іншому досліді, зразок масою 30,2 г відпрацьованого каталізатора для очищення вихлопних газів автомобілів, який номінально містить 0,22% Pt + Rh, пропускали через лабораторну молоткову дробарку, на виході з якої було розташоване сито з розміром комірок 16 мкм. На сепараторі було отримано 12,5% концентрату, що містить 1,11% Pt і 0,082% Rh. Відходи протягом 20 с подрібнювали в млині і знову направляли в сепаратор, в результаті чого отримували 14,5 % концентрату, що містив 0,20 % Pt, 0,01% Rh і 73% відходів, що містили 0,03% Pt і 0,003% Rh. Таким чином, 88,5% Pt і 89,3% Rh були вилучені в концентрат; обидва концентрати в сумі склали 27% від маси вихідного матеріалу.

**Висновки.** На основі проведених досліджень щодо вилучення платини з відпрацьованих каталізаторів можна зробити такі висновки:

1. Для досягнення високого рівня вилучення платини (98% і більше) під час операцій вилуговування та відмивання нерозчинного залишку немає потреби в обробці окиснювачем до зна-

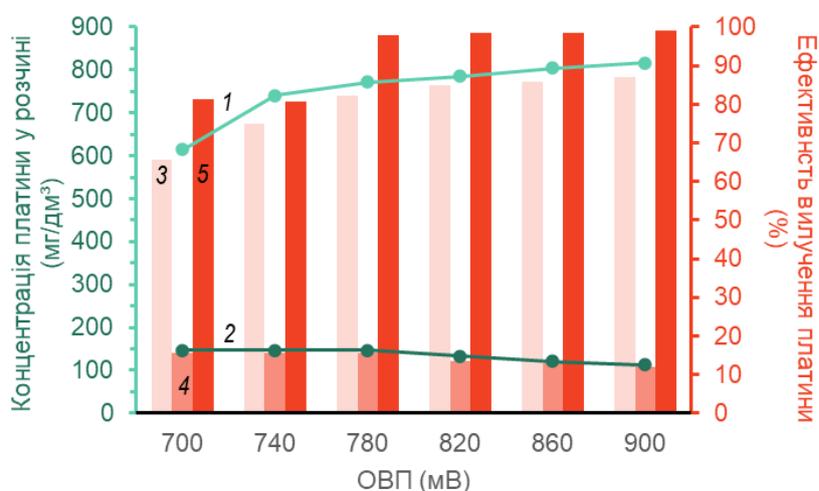


Рис. 1. Залежність ефективності рекуперації платини від ОВП розчину  
 1 – концентрація платини після першого вилуговування; 2 – концентрація платини після другого вилуговування; 3 – ефективність першого вилуговування; 4 – ефективність другого вилуговування; 5 – загальна ефективність

чення окисно-відновного потенціалу (ОВП) понад 850 мВ. Оптимальне значення ОВП у пульпі відносно хлорсрібного електрода порівняння становить 780–840 мВ, що забезпечує повне вилучення платини в розчин без непродуктивних витрат нітратної кислоти та зниження вилучення ренію.

2. Експеримент з платиновим каталізатором R-56 (з вмістом платини 0,3%) продемонстрував ефективність двостадійного процесу: обпалення при 700 °С та 1250 °С, розпульповування в 3 М нітратній кислоті, нагрівання до 90–95 °С з підтримкою заданого ОВП, перемішування, охолодження та фільтрація. Повторна обробка осаду дозволяє досягти високої ефективності вилучення, результати якої представлено на рис. 1.

3. У каталізаторах на основі дорогоцінних металів, нанесених тонким шаром (наприклад,

для очищення вихлопних газів автомобілів з вмістом металів 0,1–0,4%), хімічні методи вилучення (як кислотне вилуговування) є витратними через великі обсяги реагентів та обладнання. Альтернативний механічний процес, що включає подрібнення в кульовій або молотковій млині до розмірів частинок <35 мкм або через сито 16 мкм, з подальшою мокрою сепарацією, дозволяє отримати концентрат з високим вмістом Pt і Rh (до 1,05% Pt та 0,04% Rh у першому прикладі).

4. У конкретних прикладах вилучення з відпрацьованих автомобільних каталізаторів досягнуто 88,5–90% Pt та 89,1–89,3% Rh у концентраті, що становить 27% від маси вихідного матеріалу. Це свідчить про ефективність методу для низькоконцентрованих матеріалів, зменшуючи витрати порівняно з хімічними підходами.

### Список літератури:

1. Kuzuhara S., Ota M., Kasuya R. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts using lithium salts and hydrochloric acid. *Materials*. 2021. V. 14. №. 22. P. 6843. <https://doi.org/10.3390/ma14226843>
2. Kukurugya F., Wouters W., Spooren J. Microwave-assisted chloride leaching for efficient recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: An approach for chemical reagent reduction. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025. V. 24. P. 100868. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100868>
3. Jha M. K. et al. Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy*. 2013. V. 133. P. 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.012>
4. Лобойко О. Я. та ін. Платиноїдний каталізатор окиснення аміаку. Механізм утворення та уловлювання втрат. *Хімічна промисловість України*. 2016. № 1 (132). С. 3–6.
5. Rasmussen S. B. et al. Characterization and regeneration of Pt-catalysts deactivated in municipal waste flue gas. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2006. V. 69. №. 1-2. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.009>
6. Alcalá R. et al. Strategies for regeneration of Pt-alloy catalysts supported on silica for propane dehydrogenation. *Applied Catalysis A: General*. 2023. V. 658. P. 119157. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119157>
7. Kinas S. et al. On the path of recovering platinum-group metals and rhenium: A review on the recent advances in secondary-source and waste materials processing. *Hydrometallurgy*. 2024. V. 223. P. 106222. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106222>
8. Liu K., Qiu Y., Li Y. Preparation of high purity platinum nitrate using spent Pt-Rh catalyst from the production of nitric acid. *Journal of Central South University*. 2023. V. 30. P. 85–94. <https://doi.org/10.1007/s11771-022-5214-3>
9. James D. et al. Catalytic decomposition/regeneration of Pt/Ba (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> catalysts: NO<sub>x</sub> storage and reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2003. V. 45. №. 2. P. 147–159. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00123-1](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00123-1)
10. Fang C., Harold M. P. Low temperature NH<sub>3</sub> regeneration of a sulfur poisoned Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monolith catalyst. *Catalysis Science & Technology*. 2023. V. 13. №. 23. С. 6718–6732. <https://doi.org/10.1039/D3CY01153D>
11. Cumaratunge L. et al. Ammonia is a hydrogen carrier in the regeneration of Pt/BaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NO<sub>x</sub> traps with H<sub>2</sub>. *Journal of Catalysis*. 2007. V. 246. №. 1. P. 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.11.008>
12. Han S. B. et al. High-Performance Chemically Regenerative Redox Fuel Cells Using a NO<sub>3</sub>–/NO Regeneration Reaction. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. V. 56. №. 11. P. 2893–2897. <https://doi.org/10.1002/anie.201610738>
13. Ruan M. et al. Regeneration and enhanced catalytic activity of Pt/C electrocatalysts. *ACS Catalysis*. 2015. V. 5. №. 1. P. 233–240. <https://doi.org/10.1021/cs5013427>
14. Yakoumis I. et al. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. V. 3. P. 100112. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100112>
15. Chen C. H. et al. Electrochemical characterization and regeneration of sulfur poisoned Pt catalysts in aqueous media. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2018. V. 816. P. 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.03.015>

**Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. RESEARCH  
ON THE REGULARITIES OF PLATINUM RECOVERY FROM SPENT CATALYSTS  
IN NITRIC ACID PRODUCTION**

*Platinum catalysts are mainly used for the production of nitric acid via the catalytic oxidation of ammonia with atmospheric oxygen. During usage, their efficiency decreases owing to the deposition of sediments on the catalyst. Various methods have been used for the regeneration of spent catalysts to restore their efficiency. This study investigated the conditions for the extraction of Pt from spent catalysts by leaching with nitric acid. It has been established that to achieve a Pt extraction of 98% or more, it is sufficient to maintain the oxidation-reduction potential (ORP) in the pulp at 780–840 mV relative to the silver chloride reference electrode, which avoids unproductive reagent consumption and a decrease in rhenium extraction. Experiments were conducted with the R-56 platinum catalyst (0.3% Pt), including calcination at 700 °C and 1250 °C, two-stage leaching in 3 M nitric acid at 90–95 °C, followed by filtration and analysis. In addition, catalysts based on precious metals applied in a thin layer (for cleaning automobile exhaust gases containing 0.1–0.4% metals) were considered, where chemical extraction methods are costly. A mechanical process has been developed: grinding in a ball or hammer mill to particle sizes <35 μm or through a 16 μm sieve with wet separation. In the examples, 88.5–90% Pt and 89.1–89.3% Rh were recovered from the concentrate, which is 27% of the mass of the starting material. This study proposes effective methods for processing spent catalysts to optimise resources and reduce environmental impacts. The research results relate to the field of non-ferrous and precious metal metallurgy, in particular to methods for extracting platinum group metals and rhenium from deactivated (spent) catalysts, which can be used in the processing of secondary raw materials. The results obtained allow for the optimisation of resource consumption, increase the efficiency of platinum metal extraction, and can be used in industry in the processing of spent catalysts to reduce the environmental impact and save raw materials.*

**Key words:** *platinum, catalyst, leaching, grinding, selectivity, regeneration.*

Дата надходження статті: 05.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025