

УДК 661.094.56
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/34>

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 АДСОРБЦІЙНОГО УЛОВЛЮВАННЯ ПЛАТИНИ, ЩО ВТРАЧАЄТЬСЯ ПІД ЧАС КОНТАКТНОГО ОКИСНЕННЯ АМОНІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

В технології виробництва нітратної кислоти під час каталітичного окиснення амоніаку киснем повітря здебільшого застосовують платиноїдні каталізатори. У процесі їх експлуатації відбувається зниження ефективності дії каталізатора, що пов'язано з відкладенням на його осадів і фізичним руйнуванням структури матеріалів, з яких він виготовлений. Сьогодні у світі загальні втрати платини становлять близько 5 т/рік. Для забезпечення сталої ефективності виробництва HNO_3 застосовують різні способи регенерації відпрацьованих каталізаторів. Стаття присвячена розробці способу зменшення втрат платиноїдів у виробництві нітратної кислоти за рахунок застосування адсорбційної оксидної уловлювальної маси. Для забезпечення необхідних поглинаючих характеристик маси необхідна відповідна модифікація, наприклад, підвищення питомої поверхні за рахунок тонкого подрібнення матеріалу в кульових млинах. У даному дослідженні як основу уловлювальної маси використовували кальцій оксид, отриманий під час подрібнення на дезінтеграторі в повітряному середовищі за швидкості обертання 5000, 10000, 15000 та 20000 об/хв. Встановлено, що отримана шихта мала розмір частинок близько 2 мкм, що дало змогу інтенсифікувати взаємодію між CaO і Pt за рахунок збільшення площі питомої поверхні. У результаті дослідження впливу температури в діапазоні 400–800 °C на ефективність уловлювання частинок платини встановлено оптимальне місце розміщення уловлювальної маси – у безпосередній близькості від каталізаторних сіток. У статті розкрито теоретичний механізм уловлювання платини, який полягає в утворенні сполуки $\text{CaO} \cdot \text{PtO}_2$ на поверхні уловлювальної маси. З'ясовано, що для підвищення міцності адсорбційного матеріалу запропоновано вводити до складу шихти композицію складу $\text{CaO} + \text{CaCl}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у кількості 10% від маси основного компонента. Для отримання пористої структури матеріалу обґрунтовано застосування вигораючої добавки – деревного вугілля. Розроблена адсорбційна маса може бути застосована для уловлювання платини в технології виробництва нітратної кислоти з метою її рециклінгу.

Ключові слова: платиноїдний каталізатор, каталітичне окиснення, селективність, регенерація, оксидний адсорбент, дезінтеграція.

Постановка проблеми. Нині основним промисловим способом отримання нітратної кислоти є каталітичне окиснення амоніаку киснем повітря. Оскільки стадія конверсії амоніаку визначає показники всього виробництва нітратної кислоти, від умов її проведення залежать витратні коефіцієнти та техніко-економічні показники виробництва HNO_3 [1, с. 45]. Проведено численні дослідження з підбору каталізаторів, технологічних умов процесу, апаратного оформлення, виявлення причин і зниження втрат каталізатора.

Найперспективнішим каталізатором для процесу окиснення амоніаку до нітроген (II) оксиду є платина, яка за активністю та селективністю перевершує всі інші вивчені зразки каталізаторів, що застосовуються в технології виробництва нітратної кислоти [2, с. 100].

Платина проявляє дуже високу каталітичну активність, забезпечуючи за 600–1000 °C високий вихід нітроген (II) оксиду (до 99%). Цей метал має низьку температуру ініціювання реакції (195–200 °C), має хорошу пластичність, ков-

кість і тягучість [3, с. 230]. Недоліками платини є її схильність до руйнування при конверсії під впливом реакційної суміші та схильність до впливу великої кількості отрут. З цих причин як каталізатори окиснення амоніаку використовують сплави платини з різними металами. Поширення набули сплави платини з родієм, паладієм і рутенієм, які мають високу температуру плавлення, легко піддаються механічній обробці. У виробництві нітратної кислоти платиноїдні каталізатори застосовуються здебільшого у вигляді сіток, зручних в експлуатації.

У процесі експлуатації відбувається зниження ефективності платинових каталізаторів, що пов'язано з відкладенням на них осадів, які утворюються в результаті протікання хімічних реакцій під впливом каталітичних отрут, що містяться в сировині. У результаті цього виникає необхідність регенерації каталізаторів. Спосіб регенерації платинових каталізаторів [4, с. 52] полягає в тому, що відпрацьований каталізатор обробляють розчинами мінеральних кислот, потім хлорвмісним газом при температурі 120 °С з подальшим відновленням у потоці водню при температурі 450 °С. Недоліком способу є застосування хлорвмісного газу за високої температури, що спричиняє корозію апаратури.

Інший спосіб передбачає відмивання каталізатора від різних металевих домішок 1,0 М розчином органічної або мінеральної кислоти, обробку відмитого каталізатора хлоро-повітряною сумішшю за парціального тиску хлору $\leq 0,05$ ат та температури ≤ 100 °С з подальшим прожарюванням каталізатора кисневмісним газом при температурі 450 °С з метою переведення платини в активну форму. Пропонований спосіб дає змогу виключити застосування дорогих хромонікелевих сталей для виготовлення апаратури, а також спрощує технологію, оскільки оброблення хлором проводять за більш низької температури (< 100 °С) [5, с. 115].

Після багаторазового проведення процесу регенерації каталізатор неминуче втрачає ефективність. При цьому його подальше використання стає недоцільним і виникає необхідність виділення дорогоцінного металу, що міститься в ньому. Для цього використовують методи хлорування або вилуговування. У разі використання методу хлорування відпрацьований каталізатор обпалюють на повітрі за температур ≤ 870 °С і обробляють хлорувальним агентом, таким як $AlCl_3$, $SiCl_4$, тощо [6, с. 103]. Утворені сполуки абсорбують водою і з отриманого розчину виділяють платину шляхом відновлення алюмінієм, цинком тощо.

Метод вилуговування заснований на використанні як кислих, так і лужних розчинів. При використанні кислоти відпрацьований каталізатор обпалюють за температури 800 °С для видалення органічних речовин, а потім протягом декількох годин вилуговують 20–60% розчином сульфатної кислоти або 20–50% розчином хлоридної кислоти за 100–140 °С [7, с. 67]. Цю реакцію проводять за підвищеного тиску – до 5,0 МПа. Потім з отриманого шламу виділяють платину.

У лужному процесі відпрацьований каталізатор піддають плавленню з надлишком натрій гідроксиду. Утворений розплав вилуговують водою і з отриманого концентрату виділяють металічну платину. Розчинення каталізатора проводять у 40%-ому розчині NaOH за температур 120–145 °С.

Усі ці способи мають значні обмеження. Видалення органічних сполук із каталізатора проводять за температур 800–1200 °С, що потребує значних витрат енергії та ускладнює проведення процесу. Внаслідок великої кількості стадій процесу, таких як випал, плавлення, осадження, декантування, фільтрування та ін., втрати платини досягають 3–5%. При проведенні лужного процесу виникає необхідність у переробці утвореного розчину алюмінату натрію, а в разі кислого процесу потрібне застосування великих кількостей кислоти. Наявність зазначених недоліків вимагає подальшого вдосконалення процесів регенерації матеріалу каталізатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Величина втрат платиноїдного каталізатора у виробництві нітратної кислоти пропорційна кількості амоніаку, що окиснюється на каталізаторі, і температурі контактування. Так, під атмосферним тиском за температури контактування 800–830 °С втрати становлять 0,045–0,050 г/т кислоти, а під підвищеним тиском за температур 900–920 °С досягають 0,15–0,20 г/т [8, с. 937]. Втрати платини для заводу середньої продуктивності 300 тис. т HNO_3 на рік становлять 45–60 кг. Нині в усьому світі втрати дорівнюють 4,85 т платини на рік. Будівництво агрегатів з виробництва нітратної кислоти великої потужності (1000–1500 т/добу) можливе тільки за використання підвищеного тиску, за якого різко зростають втрати каталізатора внаслідок підвищення температури. У цих умовах економія платиноїдних металів набуває особливого значення.

Намічається два шляхи вирішення цієї проблеми. Перший з них – заміна платинового каталізатора на неплатиновий [9, с. 104644]. Але досі ще не розроблено такого каталізатора, який би

наближався за активністю і часом її збереження до платиногого. Внаслідок того, що повністю відмовитися від каталізатора з платиноїдних металів нині неможливо, необхідно розробити способи вловлювання і повернення втраченого каталізатора у виробництво. Частинки платини, родію і паладію розміром ≥ 40 мкм становлять 40–45%, а решта – ≤ 5 мкм [10, с. 182], причому останні уловити найбільш складно.

В нітратній промисловості платину вловлюють за допомогою фільтрів зі скляної вати, що розміщуються після котлів-утилізаторів. Ступінь уловлювання такими фільтрами не перевищує 30%. Для уловлювання платини також застосовують кільця Рашига, виконані з металу або кераміки [11, с. 128266], при ступені уловлювання 50–55%. Застосовують також жароміцні сітки та кільця, вкриті шаром золота або срібла, які поміщають у контактному апараті в зоні з температурою близько 660 °C [12, с. 111].

Відомо багато пропозицій щодо уловлювання платини різними масами з вогнетривких матеріалів [13, с. 27]. Ефективний спосіб уловлювання [14, с. 40] застосовує шматочки мармуру, які завантажуються в кошик товщиною 100–150 мм під каталізаторними сітками, що гарантує 80% уловлювання. Також запропоновані уловлювальні маси, що складаються переважно з вогнетривких матеріалів [15, с. 13]. Були досліджені вапно, доломіт, SiO_2 , MgO та ін. Встановлено, що Fe_2O_3 і SiO_2 платину практично не вловлюють, а маси на основі MgO вловлюють у 6 разів менше платини, ніж на основі CaO .

Для уловлювання дорогоцінних металів, що втрачаються каталізатором під час окиснення амоніаку, випробувано силікагель, оксиди цирконію та алюмінію, цеоліти, різні суміші оксидів барію, кальцію, цинку і деякі інші матеріали. Показано, що силікагель і цеоліти незважаючи на дуже велику поверхню, майже не вловлюють платину; краще працюють ZrO_2 і Al_2O_3 , і найефективніше – маси на основі кальцій оксиду [16, с. 114383]. З цього можна зробити висновок, що уловлювальні маси працюють не як фільтри, а як речовини, з якими платина вступає в хімічну взаємодію.

Постановка завдання. Мета дослідження – визначити ефективність застосування адсорбційної маси на основі оксиду кальцію для поглинання частинок платини з потоку відхідних газів, що утворюються під час контактного окиснення амоніаку.

Виклад основного матеріалу. Після того, як було встановлено, що найкраще вловлює платину маса на основі CaO , було відпрацьовано

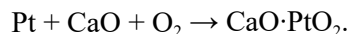
методику її приготування, в результаті чого маса набула високої термічної стійкості і механічної міцності. Лабораторні дослідження показали, що цей матеріал уловлює до 70% платини, яку втрачає каталізатор.

Для визначення місця розміщення уловлювальної маси у вузлі окиснення амоніаку дослідження проводили за різних температур (800, 600 і 400 °C). Встановлено, що чим вища температура, тим вище ступінь уловлювання. Це означає, що розміщувати масу слід у безпосередній близькості від каталізаторних сіток. Якщо за 800 °C уловлювання становило 70–75%, то за 400 °C – 20–25%. Мікроструктурний аналіз частинок маси з уловленою платиною показав, що платина сідає тільки на поверхні маси, дуже тонким шаром, не проникаючи всередину. Це свідчить про те, що платина, ймовірно, взаємодіє з поверхнею шматочків з CaO шляхов так би мовити «приварювання». Взаємодія частинок платини з поверхнею маси тим ефективніша, чим вища температура. Частинки платини взаємодіють з поверхнею маси, поки вона вся не буде заповнена, а наступні частинки зварюються з уже осілими доти, доки вони не перестануть зчіплюватися. З часом ступінь уловлювання платини закономірно зменшується.

Висловлено кілька точок зору на механізм уловлювання платини. Наприклад, у роботі [17, с. 485] вважають, що втрати платини під час окиснення амоніаку виникають не через механічне відривання частинок металу від каталізаторних сіток, а внаслідок хімічних реакцій. Рентгенографічні дослідження показують, що в нальоті на шматочках уловлювальної маси металевої платини дуже мало (у вигляді первинної металевої платини не більше 1%). Можна припустити, що від платинових сіток платина відривається у вигляді летючого оксиду PtO_2 .

Уловлювання кальцій оксидом полягає в тому, що між PtO_2 і CaO відбувається хімічна реакція. Інші сполуки кальцію, наприклад CaSO_4 кальцію, з платиною майже не взаємодіють. Термографічні дослідження вказують на те, що PtO_2 є нестійкою сполукою, яка за температури 700 °C розкладається до Pt і O_2 . Але в присутності реакційно-здатного кальцій оксиду PtO_2 не розкладається.

Згідно з [18, с. 82], сполуки, що утворюються в умовах промислового окиснення амоніаку, можна одержати штучно під час взаємодії металевої платини з кальцій оксидом за реакцією:



Втрати платини бувають двох типів – механічні (внаслідок процесів дезінтеграції та рекристалізації

структури платинового дроту, а також – під час переходу платини в газову фазу, що відбувається під час взаємодії металу з компонентами нітрозних газів [19, с. 1928]. Припущення, що втрати відбуваються в газовій фазі через утворення леткого оксиду платини, найбільш правдоподібне. Про це свідчить і те, що добавка менш леткого родію до платини сприяє підвищенню міцності сплаву каталізаторних сіток.

У результаті відпрацювання методів приготування вловлювальної маси на основі CaO встановлено, що запропонований склад вловлює $>50\%$ Pt , але для підтримання високих ступенів конверсії амоніаку необхідно конвертувати якомога чистіші гази. Оксиди заліза та пил знижують ступінь контактування на платиноїдному каталізаторі й ефективність уловлювання, екрануючи поверхню уловлювальної маси.

Вибір кальцій оксиду зумовлений значно більшою здатністю сорбувати платиноїди, на відміну від магній оксиду або алюміній оксиду, які володіють хорошою вологостійкістю, але мають ушестеро меншу сорбційну здатність, порівняно з CaO [20, с. 100327].

У даній роботі модифікація адсорбційної маси полягала в одержанні адсорбенту на основі CaO , що має підвищену вологостійкість і розвинену пористу поверхню. Збільшення поверхні дає змогу підвищити сорбційну здатність за платиноїдами, проте призводить до стоншення стінок каналів і пор, тобто до втрат адсорбенту.

У роботі використовувався CaO , отриманий під час подрібнення негашеного вапна на дезінтеграторі в повітряному середовищі за швидкості обертання ротору 5000, 10000, 15000, 20000 об/хв. Отримана шихта мала розмір частинок близько 2 мкм, що дало змогу інтенсифікувати взаємодію між компонентами завдяки збільшенню поверхні. Спроби досягти більш високого значення питомої поверхні за рахунок дворазового оброблення при однаковому режимі роботи дезінтегратора призводить до зменшення питомої поверхні часток внаслідок їх агрегації, що небажане (рисунок 1).

При дезінтеграції відбуваються виникнення і розвиток внутрішніх напружень в об'ємі зразка. Отримати близькі значення фракційного складу можливо за рахунок подрібнення вихідного зразка в дезінтеграторі завдяки розриву зв'язків між частинками. Це дає змогу значно зменшити вплив внутрішніх напружень за умови рівномірного розподілу частинок, які беруть участь у хімічних реакціях.

Введення гідравлічно-активної добавки $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у кількості 10% від маси основного компонента, поряд з ущільненням шихти, дає змогу

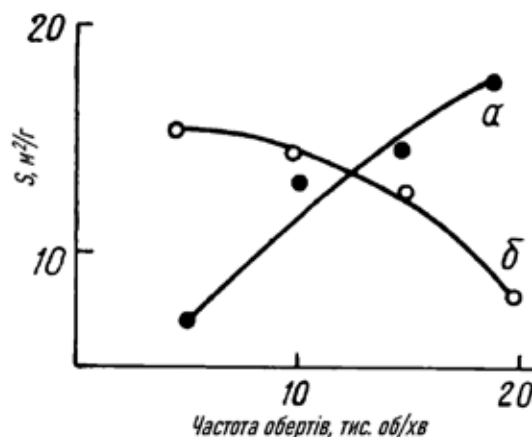


Рис. 1. Зміни питомої поверхні зразків адсорбенту після обробки в дезінтеграторі

α – одноразова обробка; δ – дворазова обробка

підвищити міцність, що зменшує втрати адсорбенту. Як основну композицію для адсорбенту запропоновано склад: $\text{CaO} + \text{CaCl}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

У літературі немає даних, які підтверджують утворення нових хімічних сполук для запропонованої композиції в області 490–530 °C [21, с. 521]. Застосування звичайного CaO під час гідратації створює метастабільну структуру $\text{Ca}(\text{OH})_2$, на що вказує ендотермічний ефект реакції при температурі 450 °C [22, с. 265]. Якщо застосувати CaO , подрібнений в дезінтеграторі за 15000 об/хв, забезпечується вищий ступінь гідратації CaO та виникнення більш щільної та стабільної структури $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Використання неподрібненого CaO призводить до утворення менш щільної структури запропонованої композиції, а це своєю чергою спричиняє фізичне зв'язування води в міжпоровому просторі, на що вказує значна втрата в масі при 90–150 °C [23, с. 499]. Аналогічна картина спостерігається для суміші 50:50 дезінтегрованого оксиду кальцію, отриманого за 10000 і 15000 об/хв. Це також свідчить про нещільне пакування часток композиції, яка утворюється, та про значний вміст фізично зв'язаної води. Дезінтегрований за 15000 об/хв CaO в процесі гідратації сприяє утворенню щільної структури композиції при практичній відсутності фізично зв'язаної води в адсорбенті. При порівнянні ступеня гідратації звичайного і дезінтегрованого зразків CaO встановлено, що в останньому відбувається сильніша взаємодія між частинками під час кристалізації гідратної фази.

Унаслідок спікання відбувається зміна поверхні за рахунок зменшення загального об'єму та радіусу пір, що відображається на сорбційній ємності уловлювальної маси. Для отримання пористої структури як основний компонент вводять виго-

пряючу добавку вугілля, яка може перебувати як на поверхні, так і всередині об'єму адсорбенту. Під час розкладання солей, що використовуються для приготування адсорбенту, відбувається виділення газоподібних продуктів у широкому інтервалі температур, що дають дуже дрібні пори і відкривають доступ повітря до частинок вугілля, які перебувають усередині адсорбенту. Останні поступово вигорають, формуючи пористу структуру.

Використання вигоряючої добавки дає змогу проводити рівномірне прожарювання, зменшуючи вплив неоднорідності структури, яка сприяє виникненню напружень. Отриманий нами адсорбент мав розвинену поверхню ($40 \text{ м}^2/\text{г}$) і пори, що змінюють свій радіус у широкому інтервалі. Наявність великих пір діаметром $1,5\text{--}2,0 \text{ мкм}$ дало змогу сорбувати частинки платиногого каталізатору не лише у вигляді механічного виносу, а й у вигляді парів оксиду металу об'ємом адсорбенту, на відміну від адсорбенту з питомою поверхнею $2,05\text{--}2,92 \text{ м}^2/\text{г}$, на якому відбувається лише хімічна взаємодія парів Pt з поверхнею [24, с. 866].

Важливим показником адсорбентів, що працюють у процесі окиснення амоніаку, є вологостійкість. Для порівняння було приготовано зразок за методикою, описаною в [25, с. 60], і три зразки на основі пропонованої композиції з дезінтегрованого CaO, отриманих за 5000, 10000, 15000 об/хв.

Вологостійкість визначали за повного занурення зразків у воду після прожарювання за 900°C протягом 1,5 год. Гідратація контрольного зразка наставала через 5–7 хв, зразків, приготованих із дезінтегрованого оксиду кальцію, – через 15, 20 і 50 хв, відповідно. Збільшення часу гідратації може бути пов'язане з більш щільним пакуванням частинок в одиниці об'ємі дезінтегрованого CaO. Крім того, щільне пакування частинок усуває порожнини, тим самим ліквідує центри, де найімовірніше відбувається процес гідратації.

Отримані експериментальні дані показують, що використання дезінтегрованого CaO дає змогу отримувати вологостійкий адсорбент. У процесі приготування адсорбенту утворюються нові сполуки, що відповідають за формування кристалізаційної структури.

Висновки. Встановлено два основні шляхи зменшення втрат платинового каталізатора під час контактного окиснення амоніаку: перший – заміна платинового каталізатора на неплатиновий, другий – вловлювання каталізатора, що втрачається, і повернення його у виробництво. Досліджено можливість окиснення амоніаку під підвищеним тиском на комбінованому каталізаторі з отриманням високого виходу продукту. Розроблено уловлювальну масу зі ступенем уловлювання платини 60–80% і визначено місце розміщення цієї маси.

Список літератури:

1. Кравченко І. В., Зубцов Є. І. Підвищення економічної та екологічної ефективності виробництва нітратної кислоти фотоокисненням N_2O у нітрозних газах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 9. С. 42–48.
2. Векшин В. О. та ін. Визначення стабільності нанесеного платинового каталізатора селективного відновлення оксидів нітрогену. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2012. № 3. С. 98–102.
3. Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посіб. Кам'янське: ДДТУ. 2017. 317 с.
4. Янушевська О. І., Кринець Г. В., Літинська М. І. Інноваційні хімічні технології переробки вторинних матеріалів. Частина 1 : навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 99 с.
5. Основи технології переробки відходів : підручник / О. І. Янушевська та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 175 с.
6. Лобойко О. Я. та ін. Окиснення амоніаку на реставрованому платиновому каталізаторі. *Питання хімії та хімічної технології*. 2010. № 2. С. 102–104.
7. Екологія у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : навч. посіб. / В. П. Шаповал та ін. Харків: Технологічний Центр, 2018. 180 с.
8. Granados-Fernández R. et al. Platinum recovery techniques for a circular economy. *Catalysts*. 2021. Vol. 11. No 8. P. 937. <https://doi.org/10.3390/catal11080937>.
9. Ding Y. et al. Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. P. 104644. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104644>.
10. Barakat M. A., Mahmoud M. H. H. Recovery of platinum from spent catalyst. *Hydrometallurgy*. 2004. Vol. 72. No 3–4. P. 179–184. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00141-5).
11. Tang H. et al. Recovery of platinum-group metals from spent catalysts by microwave smelting. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 318. P. 128266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128266>.

12. Dong H. et al. Recovery of platinum group metals from spent catalysts: a review. *International Journal of Mineral Processing*. 2015. Vol. 145. P. 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.06.009>.
13. Jha M. K. et al. Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 133. P. 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.012>.
14. Tsirambides A., Filippidis A. Critical and Strategic Metal Resources of Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2024. Vol. 61. No 1. P. 10-43. <https://doi.org/10.12681/bgsg.37171>.
15. Asadzadeh M., Sajadi S. A. A. Separation and recovery of platinum and palladium from spent petrochemical catalysts using activated carbon, analysis of two kind of most used catalysts in petro chemistry. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*. 2018. Vol. 37. No 5. P. 9-18.
16. Sun S. et al. A review on management of waste three-way catalysts and strategies for recovery of platinum group metals from them. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 305. P. 114383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114383>.
17. Prasetyo E., Anderson C. Platinum group elements recovery from used catalytic converters by acidic fusion and leaching. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 4. P. 485. <https://doi.org/10.3390/met10040485>.
18. Ivanova A. et al. Formation of Pt(O)/Si(Ca)O₂ nanofibers upon the reaction of platinum aerosol particles with a calcium-and silicon-containing material. *Doklady Physical Chemistry*. 2006. Vol. 407. No 1. P. 80-83. <https://doi.org/10.1134/S0012501606030067>.
19. Duclos L. et al. Closing the loop: Life cycle assessment and optimization of a PEMFC platinum-based catalyst recycling process. *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22. No 6. P. 1919-1933. <https://doi.org/10.1039/C9GC03630J>.
20. Kolbadinejad S., Ghaemi A. Recovery and extraction of platinum from spent catalysts: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. Vol. 7. P. 100327. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100327>.
21. Reckeweg O., DiSalvo F. J. Alkaline earth metal oxyhalides revisited—syntheses and crystal structures of Sr₄OBr₆, Ba₄OBr₆ and Ba₂OI₂. *Zeitschrift für Naturforschung B*. 2008. Vol. 63. No 5. P. 519-524. <https://doi.org/10.1515/znbn-2008-0507>.
22. Boswell F. C., Meisinger J. J., Case N. L. Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. *Fertilizer technology and use*. 1985. P. 229-292.
23. Trindade A. F., Gois P. M. P., Afonso C. A. M. Recyclable stereoselective catalysts. *Chemical reviews*. 2009. Vol. 109. No 2. P. 418-514. <https://doi.org/10.1021/cr500084c>.
24. Palma V. et al. Platinum based catalysts in the water gas shift reaction: Recent advances. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 7. P. 866. <https://doi.org/10.3390/met10070866>.
25. Гринь Г.І., Казаков В.В., Кузнецов П.В. Дослідження й розробка каталізаторів в нітратній промисловості науковою школою В.І. Атрощенко. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. № 6/3 (30). С. 58–62.

Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDIES OF ADSORPTION CAPTURE OF PLATINUM LOST DURING CONTACT OXIDATION OF AMMONIA IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID

Platinum catalysts are mostly used for the production of nitric acid during the catalytic oxidation of ammonia with oxygen. During operation, the efficiency of the catalyst decreases because of the deposition of sediments on its surface and physical destruction of the structure of the materials from which it is made. Currently, the total loss of platinum worldwide is approximately five tons per year. To ensure the sustainable efficiency of HNO₃ production, various methods for the regeneration of spent catalysts have been used. This article is devoted to the development of a method for reducing platinum losses in the production of nitric acid using an adsorption oxide catching mass. To ensure the required absorption characteristics of the mass, an appropriate modification is required, for example, increasing the specific surface area by fine grinding the material in ball mills. In this study, the calcium oxide obtained during grinding in a disintegrator in an air environment at rotational speeds of 5000, 10000, 15000, and 20000 rpm was used as the basis of the catching mass. The resulting charge had a particle size of approximately 2 μm, which made it possible to intensify the interaction between CaO and Pt by increasing the specific surface area. By studying the effect of temperature in the range of 400-800 °C on the efficiency of platinum particle capture, the optimal location of the capture mass was determined in the immediate vicinity of the catalyst nets. This article reveals the theoretical mechanism of platinum capture, which involves the formation of a CaO·PtO₂ compound on the surface of the collecting mass. It has been found that to increase the strength of the adsorption material, it is proposed to introduce a composition of CaO, CaCl₂, and CaO·Al₂O₃ in the amount of 10% by weight of the main component into the charge. A burning additive, charcoal, was used to obtain the porous structure of the material. The developed adsorption mass can be used to capture platinum during nitric acid production for recycling.

Key words: platinum catalyst, catalytic oxidation, selectivity, regeneration, oxide adsorbent, disintegration.