

УДК 546.78

Г. М. Резніченко, к. т. н., ст. викладач

Національний університет цивільного захисту України

вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023

А. М. Бутенко, д. т. н., проф.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Багалея, 21, м. Харків, Україна, 61002

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ВОЛЬФРАМОВІСНОЇ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

Проаналізовано існуючі методи зниження рівня оксидів азоту в газових викидах хімічних та металургійних виробництв. Запропоновано використання гетерофазного озонного методу денітрифікації газових потоків у технологіях переробки вольфрамівмісної вторинної сировини. Встановлено позитивний вплив озонування реакційного середовища на взаємодію нітратної кислоти з нікелем та залізом. Зокрема найнижчий рівень оксидів азоту в газових викидах спостерігається за температури 301 К за наявності озону, коли нікель та залізо переходять в розчин приблизно втричі швидше, у порівнянні з існуючими процесами. Визначено, що за умов застосування озону взаємодія невольфрамівмісних компонентів із нітратною кислотою відбувається за реакціями першого порядку за нікелем та залізом із величиною уявної енергії активації 13,7 кДж/моль та 12,6 кДж/моль відповідно, що вказує на дифузійну область їх протікання. Реалізація вказаних кінетичних параметрів дозволяє знизити вміст оксидів азоту в газових викидах до 15 %.

Ключові слова: екологічно безпечна технологія, захист атмосферного повітря, озонування, оксиди азоту, вторинна сировина, вольфрамівмісні сплави.

Постановка проблеми. Процес переробки вторинної вольфрамівмісної сировини має важливе значення для промисловості, економіки та забезпечення екологічної безпеки України; по-перше, через відсутність сировинної бази та вольфрамових родовищ, а по-друге, унаслідок акумулювання на звалищах і шламонакопичувачах твердих відходів, до складу яких входять полівалентні метали та інші сполуки.

У роботі [1] запропоновано технологію переробки вторинної сировини зі складним вмістом полівалентних металів, що полягає у кислотному розчиненні домішок сполук нікелю та феруму з отриманням окремої твердої фази вольфраму. Для досягнення мети цієї роботи авторами запропоновано використовувати нітратну кислоту, що взаємодіє з нікелем та залізом, внаслідок чого до атмосферного повітря можуть надходити оксиди азоту. Перевищення концентрації NO_x , як відомо [2], призводить до руйнування озонового шару Землі, утворення фотохімічного смогу та кислотних дощів. Крім того, повітряні маси переносять ці речовини на значні відстані – відбувається трансграничне забруднення навколишнього середовища. Слід зазначити також на шкідливий вплив оксидів азоту для людини, а саме подразнення дихальних шляхів, отруєння, сенсорні, функціональні і патологічні ефекти. Надлишок оксидів азоту призводить до зменшення кількості хлорофілу у листі рослин, припинення їхнього росту і плодоносіння, мутагенних ефектів [2].

Тому задача забезпечення очищення газових викидів від NO_x , з метою запобігання забруднення атмосферного повітря, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропоновано та існує багато способів зменшення кількості NO_x у відхідних газах, які умовно можна поділити на каталітичні й хемосорбційні. В

більшості вони мають низький ступінь перетворення та спрямовані на переробку NO_x із подальшим відновленням їх до елементарного азоту без утворення цільових продуктів. Щоб уникнути цих недоліків, у роботі [3] запропоновано використовувати гетерофазний озонний метод денітрифікації газових потоків, що є ефективним для очищення вихідних газів хімічних та металургійних виробництв великих потужностей.

Автор у роботі [3] досить повно дослідив та обґрунтував використання гетерофазного озонного способу для зниження вмісту NO_x за рахунок спільного окиснення NO і утворення азотної кислоти в одному об'ємі на стадії поглинання оксидів азоту. Застосування цього методу для зниження кількості оксидів азоту в газових викидах технології переробки вторинної вольфрамівмісної сировини є найбільш доцільним, за умови використання його на найбільш ранніх стадіях, а саме під час кислотного розчинення нікелю та заліза.

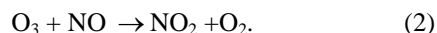
Постановка завдання та його вирішення. Для застосування обраного способу зниження кількості оксидів азоту та підвищення ефективності процесу розчинення нікелю та заліза необхідно дослідити кінетику та механізми цього процесу за наявності озону для встановлення технологічних та кінетичних показників цих процесів. Саме це автори цього дослідження поставили собі за мету.

Об'єкт дослідження – спосіб зниження кількості оксидів азоту, що утворюються в технології переробки вольфрамівмісної вторинної сировини.

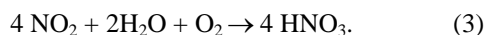
Предмет дослідження – фізико-хімічні закономірності процесу розчинення нікелю та заліза за наявності озону в технології переробки вольфрамівмісної вторинної сировини.

Таким чином, запропоновано вилучення невольфрамівмісних компонентів проводити із

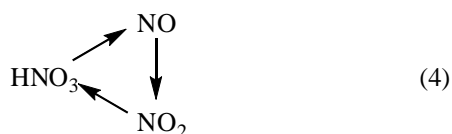
застосуванням нітратної кислоти за наявності озону. Це було зроблено для того, щоб нітроген оксид, який виділяється під час реакції (1), легко окиснювався озоном відповідно до рівняння реакції (2):



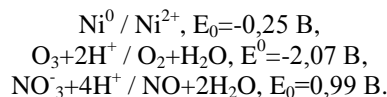
Утворений нітроген діоксид у середовищі, яке збагаченому присутністю молекулярним киснем знов перетворюється у нітратну кислоту



Таким чином цикл стає замкнутим

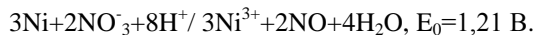


Слід додати, що озон у кислому середовищі значно полегшує окиснення нікелю у відповідний оксид, у порівнянні з нітратною кислотою:

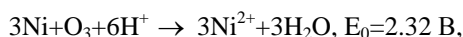


Це підтверджується також розрахунками електрорушійної сили окисно-відновних реакцій, відображених рівняннями (1) і (7) [4–5].

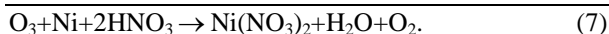
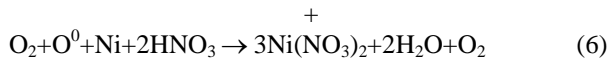
У випадку застосування HNO_3



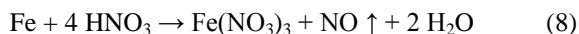
У випадку застосування $\text{HNO}_3 + \text{O}_3$



або в молекулярній формі:

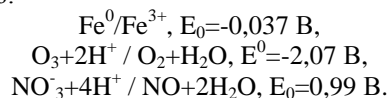


Хімічна взаємодія заліза, що міститься поряд з нікелем у складі зв'язуючого компоненту відпрацьованого вольфрамового сплаву, з розведеною нітратною кислотою, з урахуванням того, що металічне залізо окиснюється до сполуки зі ступенем окиснення +3, описується наступним рівнянням



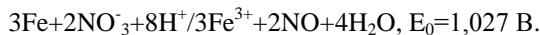
З урахуванням того, що озон у кислому середовищі значно полегшує й окиснення заліза до

відповідного оксиду в порівнянні з нітратною кислотою:

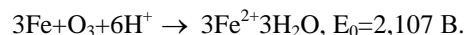


Це підтверджується розрахунками електрорушійної сили окисно-відновних реакцій, відображених рівнянням (11).

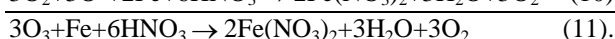
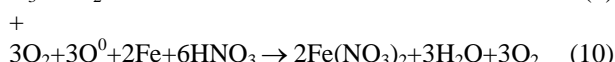
У випадку застосування HNO_3



У випадку застосування $\text{HNO}_3 + \text{O}_3$



В молекулярній формі:



Досліди проводили з використанням установки, відмінна риса якої полягала в тому, що замість абсорбції можливих викидів нітроген оксидів, які утворюються як побічний продукт, розчином гідроген пероксиду й розчином калій гідроксиду використовували озонатор Озон 60П продуктивністю 130 – 170 г/год, з урахуванням того, що озон O_3 являє собою дуже сильний окисник і є значно сильнішим, ніж O_2 , але слабшим, ніж O^0 .

Отримані дані, що представлені на рисунку 1 відображають залежність ступеня вилучення нікелю від терміну контактування зразків відпрацьованої вольфрамовмісної сировини з нітратною кислотою з концентрацією 35 % за наявності озону і тільки нітратною кислотою.

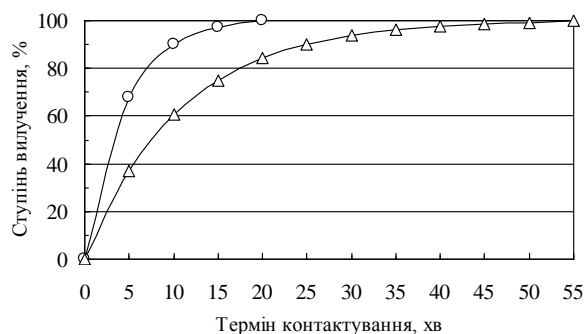


Рисунок 1 – Залежність ступеня вилучення нікелю від терміну контактування зразків відпрацьованої вольфрамовмісної сировини за температури 301 К: Δ – з розчином нітратної кислоти; \circ – з нітратною кислотою за наявності озону

Отримані дані свідчать, що повне вилучення нікелю з відпрацьованої вольфрамовмісної сировини нітратною кислотою відбувається впродовж 55

хвилини, в той час як за наявності озону для здійснення вказаного процесу достатньо всього 20 хвилин, тобто у 2,75 рази швидше, що визначається у відповідності з розрахунками електрорушійної сили, які були проведені з використанням рівнянь (1) і (7) [6–7].

На рисунку 2 відображена залежність ступеня вилучення заліза від терміну контактування зразків відпрацьованої вольфрамвмісної сировини з концентрацією 35 % та з нітратною кислотою тієї ж концентрації за наявності озону.

Аналіз отриманої залежності ступеня вилучення заліза від терміну контактування відпрацьованої вольфрамвмісної сировини з реакційним середовищем свідчить, що повне його вилучення озонованим розчином нітратної кислоти закінчилось упродовж 12 хвилин за температури навіть 301 К, в той час як за відсутності УФ-випромінювання в неозонованому розчині нітратної кислоти такої ж вихідної концентрації за 35 хвилин, тобто практично у термін, втричі довший [8].

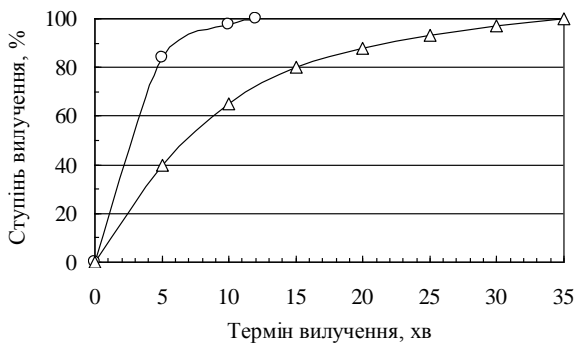


Рисунок 2 – Залежність ступеня вилучення заліза від терміну контактування відпрацьованої вольфрамвмісної сировини за температури 301 К: Δ – з нітратною кислотою; \circ – з нітратною кислотою за наявності озону

Поряд із цим, для більш детального дослідження процесу проводили обчислення деяких його кінетичних параметрів. Для знаходження порядку реакції вилучення нікелю та заліза із вторинної вольфрамвмісної сировини за наявності озону (7) та (11) використовували як аналітичний, так і графічний методи [9]. Сутність аналітичного методу полягала у підстановці експериментальних даних у вираз константи швидкості різних (цілісночисельних) порядків і порівняння між собою значень констант швидкостей, одержаних для кожного кінетичного рівняння. Для реакції:

$$\text{першого порядку} \quad k_1 = \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right); \quad (12)$$

$$\text{другого порядку} \quad k_2 = \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right); \quad (13)$$

$$\text{третього порядку} \quad k_3 = \frac{1}{2\tau} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{1}{C_0^2} \right). \quad (14)$$

де C_0 – початкова концентрація металу у зразку, %; C – залишкова концентрація металу у зразку, %; τ – термін контактування металу з реакційним середовищем, с.

Розрахунки з використанням кожної з наведених формул дають можливість отримати наступний набір значень констант швидкості реакції $k_{1-(1-3)}$ вилучення нікелю та заліза $k_{2-(1-3)}$ з відпрацьованої вольфрамвмісної сировини для першого, другого та третього порядків відповідно, наприклад, за температури $T = 291$ К:

$$k_{1-1} (3,798 \cdot 10^{-3}; 3,807 \cdot 10^{-3}; 3,802 \cdot 10^{-3}; 3,803 \cdot 10^{-3}) \text{ с}^{-1},$$

$$k_{1-2} (6,32 \cdot 10^{-1}; 1,59 \cdot 10^{-2}; 1,51 \cdot 10^{-2}; 2,10 \cdot 10^{-2}) \text{ с}^{-1}(\%)^{-1},$$

$$k_{1-3} (6,93 \cdot 10^{-1}; 1,45 \cdot 10^{-2}; 2,65 \cdot 10^{-2}; 5,7 \cdot 10^{-2}) \text{ с}^{-1}(\%)^{-1}.$$

$$k_{2-1} (1,82 \cdot 10^{-3}; 1,80 \cdot 10^{-3}; 1,79 \cdot 10^{-3}; 1,84 \cdot 10^{-3}; 1,82 \cdot 10^{-3}; 1,81 \cdot 10^{-3}) \text{ с}^{-1},$$

$$k_{2-2} (2,21 \cdot 10^{-1}; 8,47 \cdot 10^{-2}; 6,15 \cdot 10^{-2}; 2,11 \cdot 10^{-2}) \text{ с}^{-1}(\%)^{-1},$$

$$k_{2-3} (7,59 \cdot 10^{-1}; 1,26 \cdot 10^{-2}; 3,97 \cdot 10^{-2}; 6,48 \cdot 10^{-2}) \text{ с}^{-1}(\%)^{-1}.$$

Як видно з розрахункових даних, значення констант швидкостей для реакцій 2-го і 3-го порядку систематично змінюються у міру перебігу реакції, тобто не залишаються сталими, у той час як значення, які обчислені за рівнянням константи швидкості реакції 1-го порядку, коливаються відносно деякої середньої величини, що становить $3,803 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ та $1,81 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ для нікелю та заліза відповідно. Таким чином, із розрахованих даних випливає, що реакція вилучення нікелю та заліза із вторинної вольфрамвмісної сировини за $T = 291$ К відповідає кінетичному рівнянню для реакції 1-го порядку [10].

Такого ж висновку щодо порядку можна дійти і внаслідок виконання розрахунків за $T = 301$ К. За цих умов константа швидкості для нікелю набуває таких значень ($3,15 \cdot 10^{-3}$; $3,18 \cdot 10^{-3}$; $3,12 \cdot 10^{-3}$; $3,15 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), що в середньому становить $3,15 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, а для реакції (11) за $T = 301$ К константа швидкості набуває в середньому значення $1,52 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Для підтвердження 1-го порядку реакції обчислювали їх значення за графічним методом. Для цього будували залежність концентрації нікелю у відпрацьованій вольфрамвмісній сировині від терміну його вилучення за різних температур (див. рис. 3).

А також визначали залежність вмісту заліза у відпрацьованій вольфрамвмісній сировині від терміну контактування (див. рис. 4).

У цих двох випадках вибирали довільно значення C_0 і знаходили проміжок часу, яке відповідає концентрації $C_0/2$. Із графічної залежності отримано наступні дані, які зведені в таблиці 1.

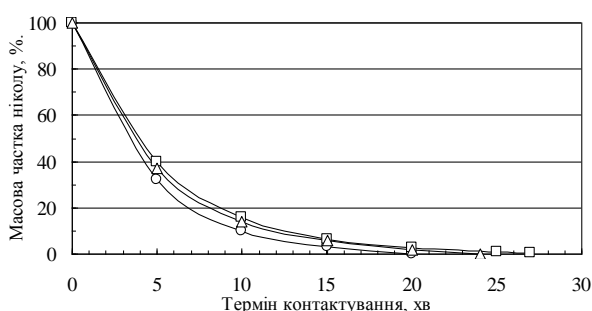


Рисунок 3 – Вміст нікелю у відпрацьованій вольфрамівмісній сировині залежно від терміну його обробки: □ – 291 К; ○ – 301 К; △ – 311 К

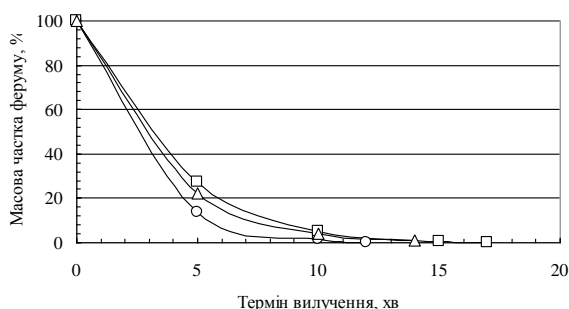


Рисунок 4 – Вміст заліза у відпрацьованій вольфрамівмісній сировині залежно від терміну його обробки: □ – 291 К; ○ – 301 К; △ – 311 К

Таблиця 1 – Залежність часу напівперетворення від температури та вихідної концентрації нікелю і заліза

Металічний елемент	Температура, К	Вихідна концентрація, C ₀ , %	Час напівперетворення, τ _{1/2} , хв
Ni	291	100	2,7
	301	75	2,2
	311	50	2,5
Fe	291	100	2,3
	301	75	1,9
	311	50	2,1

Тобто проміжок часу, за перебіг якого прореагувало 50 % вихідної концентрації нікелю та заліза, не залежить від їх початкових концентрацій, що також підтверджує належність реакції до 1-го порядку за нікелем та залізом відповідно в інтервалі температур 291–311 К.

На основі одержаних даних визначали енергію активації, температурний коефіцієнт тощо – кінетичні показники реакції вилучення нікелю та заліза.

Енергію активації $E_{акт}$ обчислювали згідно з рівнянням Арреніуса

$$E_{акт} = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}}\right)}{T_2 - T_1}, \quad (15)$$

де R – мольна газова стала, 8,31 Дж/(моль·К).

Для нікелю

$$E_{акт} = 13654 \text{ Дж/моль} \approx 13,7 \text{ кДж/моль} \cdot$$

Для заліза

$$E_{акт} = 12661 \text{ Дж/моль} \approx 12,6 \text{ кДж/моль} \cdot$$

Температурний інтервал 291–301 К був узятий із тих міркувань, що розчинність газоватих учасників реакції O₃, O₂, NO і NO₂, з одного боку, тим більша, чим нижча температура, а отже й їх участь у реакціях, поданих рівняннями (2), (3), (7) та (8), буде більш імовірною; з іншого боку, підтримання більш низьких температур потребує використання спеціального обладнання, що пов'язано з додатковими матеріальними витратами.

Температурний коефіцієнт реакції γ розраховували на основі емпіричного правила Вант-Гоффа

$$\gamma^1 = \frac{k_{301}}{k_{291}} \quad (16)$$

Отримані значення $\gamma_{Ni} = 1,2$ та $\gamma_{Fe} = 1,19$ є характерними для реакцій, перебіг яких відбувається у дифузійній області.

Температурний коефіцієнт реакції можна обчислити також і за допомогою рівняння Арреніуса

$$\gamma = e^{\frac{10E}{RT^2}}. \quad (17)$$

Підстановка експериментальних даних у залежність (17) приводить до отримання, наприклад, для нікелю, наступних значень: $\gamma_{301} = 1,19$; $\gamma_{291} = 1,21$, що в середньому також дорівнює 1,2, а для заліза підстановка експериментальних даних призводить до отримання значення $\gamma_{Fe} = 1,19$.

Відповідно до рівнянням Арреніуса є можливість визначити значення передекспоненційного множника

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{RT}}, \quad (18)$$

де A – передекспоненційний множник (частота зіткнень частинок у секунду в одиниці об'єму реакційного середовища).

З цієї метою використовували логарифмічну форму рівняння (16)

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T}. \quad (19)$$

Обчислення за цим рівнянням показує, що для нікелю значення A_{Ni} становить $0,9 \cdot 10^2$, а для заліза $A_{Fe} = 0,29 \cdot 10^2$.

Визначення константи швидкості реакції і значення передекспоненційного множника дало

можливість рівняння формальної кінетики для незворотної реакції (7) та (8) у цьому інтервалі температур подати у вигляді (20) та (21) відповідно:

$$k = 0.9 \cdot 10^2 \cdot e^{\frac{-1.3710^4}{RT}}, \quad (20)$$

$$k = 0.29 \cdot 10^2 \cdot e^{\frac{-1.2610^4}{RT}}. \quad (21)$$

Таким чином, на основі досліджень зміни концентрації нікелю та заліза залежно від терміну вилучення за температур 291 та 301 К, за оптимальних умов проведення процесу, встановлено, що реакція вилучення нікелю та заліза із вторинної вольфрамвмісної сировини є реакціями першого порядку з величиною уявної енергії активації 13,7 кДж/моль та 12,6 кДж/моль відповідно, що вказує на дифузійну область їх протікання.

Висновки. З метою забезпечення екологічної безпеки під час переробки вольфрамвмісної

вторинної сировини, а саме усунення виділення оксидів азоту в атмосферне повітря, запропоновано проводити процес із додатковим озонуванням розчину.

Встановлено, що озонування реакційного середовища у разі вилучення нікелю та заліза позитивно впливає на їх взаємодію з нітратною кислотою, зокрема за температури лише 301 К нікель та залізо переходять у розчин приблизно втричі швидше, у порівнянні з проведенням вказаного процесу за відсутності озону.

Визначено, що за умов застосування озону взаємодія невольфрамвмісних компонентів з нітратною кислотою є реакціями першого порядку за нікелем та залізом із величиною уявної енергії активації 13,7 кДж/моль та 12,6 кДж/моль відповідно, що вказує на дифузійну область їх протікання. Реалізація вказаних кінетичних параметрів дозволяє знизити вміст оксидів азоту в газових викидах до 15 %.

Література

1. Резніченко Г. М. Розробка екологічно безпечної й ресурсозберігаючої технології переробки вторинної сировини зі складним вмістом полівалентних металів / Г. М. Резніченко, А. М. Бутенко // Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека» : – 2017. – №1. – С. 61–67.
2. Жуковский Т. Ф. Дослідження викидів оксидів азоту в атмосферне повітря від котлоагрегатів ЗАТ «Теплоенергоцентр-3» м. Харкова / Т. Ф. Жуковский, О. Л. Проценко // Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст» : – 2010. – № 93. – С. 290–294.
3. Столяренко Г. С. Гетерофазні озонні процеси денітрифікації технологічних газових потоків / Г. С. Столяренко // Хімічні технології та екологічна безпека. – 2010. – № 2. – С. 177–187.
4. Резніченко В. В. Характер вилучення феруму із відпрацьованих вольфрамвмісних інструментальних сплавів у присутності озону / В. В. Резніченко, А. М. Бутенко, О. Я. Лобойко // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. – 2009 – Вып. 2(32). – С. 205–210.
5. Резніченко В. В. Вплив озонування середовища на характер вилучення нікелю із вторинної вольфрамвмісної сировини / В. В. Резніченко, А. М. Бутенко, О. Я. Лобойко, Н. Б. Маркова // Вопросы химии и химической технологии – 2010. – № 2. – С. 114–118.
6. Аксельруд Г. А. Розчинення твердих тіл / Г. А. Аксельруд. – М. : Хімія, 1977. – 349 с.
7. Резніченко В. В. Ефективність вилучення невольфрамвмісних компонентів у присутності озону із сплаву ВНЖ-90 / В. В. Резніченко, А. М. Бутенко, О. Я. Лобойко, Н. Б. Маркова : матеріали IV всеукр. наук. конф. – Донецьк : ДонНУ. – 2010. – С. 196.
8. Резніченко В. В. Особливості хімічного витягнення феруму із відпрацьованих виробів на основі вольфраму у присутності озону / В. В. Резніченко, А. М. Бутенко, О. Я. Лобойко, Н. Б. Маркова : матеріали XVIII міжнар. наук.-практ. конф. – Харків : НТУ «ХП». – 2010. – С. 244.
9. Стромберг А. Г. Физическая химия : учебник для ВУЗов / А. Г. Стромберг, Д. П. Семченко. – М. : Высшая школа, 2006. – 527 с.
10. Резніченко В. В. Роль озона в процесі переробки вторинного вольфрамсодержащего сырья / В. В. Резніченко, А. Н. Бутенко, О. Я. Лобойко : матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. – Дніпропетрівськ : УДХТУ. – 2011. – С. 94.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2017

А. М. Резніченко, А. Н. Бутенко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩЕГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Проанализированы существующие методы снижения уровня оксидов азота в газовых выбросах химических и металлургических производств. Предложено использование гетерофазного озонного метода денитрификации газовых потоков в технологиях переработки вольфрамсодержащего вторичного сырья. Установлено положительное влияние озонирования реакционной среды на взаимодействие азотной кислоты с никелем и железом. В частности, самый низкий уровень оксидов азота в газовых выбросах наблюдается при температуре 301 К в присутствии озона, когда никель и железо переходят в раствор примерно в три раза быстрее, по сравнению с существующими процессами. Определено, что в условиях применения озона взаимодействие

невольфрамсодержащих компонентов с азотной кислотой происходит реакциями первого порядка по никелю и железу с величиной кажущейся энергии активации 13,7 кДж/моль и 12,6 кДж/моль соответственно, что указывает на диффузионную область их протекания. Реализация указанных кинетических параметров позволяет снизить содержание оксидов азота в газовых выбросах до 15%.

Ключевые слова: экологически безопасная технология, защита атмосферного воздуха, озонирование, оксиды азота, вторичное сырье, вольфрамсодержащие сплавы.

M. Reznichenko, A. Butenko

INVESTIGATION OF METHODS OF PROTECTION OF ATMOSPHERIC AIR IN PROCESSING OF TUNNEL-CONTAINING SECONDARY RAW MATERIALS

The existing methods of reducing the level of nitrogen oxides in gas emissions of chemical and metallurgical industries are analyzed. The use of a heterophase ozone method for the denitrification of gas streams in technologies for processing tungsten raw materials is proposed. The positive effect of ozonation of the reaction medium on the reaction of nitric acid with nickel and iron was established. In particular, the lowest level of nitrogen oxides is observed at a temperature of 301 K in the presence of ozone, when nickel and iron pass into the solution about three times faster than existing processes. It is determined that under the conditions of ozone application the interactions of non-phosphoric components with nitric acid are first-order reactions in nickel and iron with an apparent activation energy value of 13.7 kJ / mol and 12.6 kJ / mol, respectively, indicating a diffusion region of their course. The implementation of these kinetic parameters allows to reduce the content of nitrogen oxides in gas emissions by 15%.

Keywords: environmentally safe technology, protection of atmospheric air, ozonization, nitrogen oxides, secondary raw materials, tungsten-containing alloys.