

USUWANIE TLENKÓW AZOTU Z PRZEMYSŁOWYCH GAZÓW ODLOTOWYCH

Józef KUROPKA

Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
jozef.kuropka@pwr.wroc.pl

STRESZCZENIE

Przedstawiono stan techniki i możliwości usuwania tlenków azotu z przemysłowych gazów odlotowych, w alkalicznych roztworach z substancjami utleniającymi. Wyniki badań absorpcji tlenków azotu w alkalicznym roztworze podchlorynu sodowego w kolumnie z wypełnieniem wykazały wysoką skuteczność usuwania tlenków azotu, w szerokim zakresie parametrów zmiennych – prędkości gazu, gęstości zraszania, stężenia tlenków azotu w gazie i stężenia roztworu zraszającego.

1. Wstęp

Tlenki azotu stanowią jeden z najbardziej uciążliwych składników gazowych, zanieczyszczających powietrze atmosferyczne. Spośród kilku możliwych form występowania tlenków azotu (N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5) w powietrzu atmosferycznym najwięcej jest tlenku azotu (NO) i ditlenku azotu (NO_2). Ich sumę ($NO+NO_2$ w przeliczeniu na NO_2) w inżynierii środowiska i w technikach spalania przyjęto oznaczać wspólnym symbolem NO_x [1]. Zanieczyszczenia te działają silnie toksycznie na środowisko człowieka, biorąc m.in. istotny udział w tworzeniu smogu fotochemicznego [2].

Tlenki azotu towarzyszą wszystkim procesom spalania paliw stałych, ciekłych i gazowych, dlatego energetyka, ciepłownictwo i transport stanowi główne i najpoważniejsze źródło tych zanieczyszczeń (tabela 1). Źródłem emisji tlenków azotu do powietrza atmosferycznego są również technologie przemysłowe, w wyniku których powstają tlenki azotu w następstwie odpowiednich reakcji chemicznych. Należą tu przede wszystkim zakłady chemiczne produkujące kwas azotowy i nawozy sztuczne, kwas siarkowy metodą nitrozową, pochodne kwasu azotowego w syntezie organicznej. Ponadto źródłem emisji NO_x są wszelkie reakcje powierzchniowego roztwarzania metali w kwasie azotowym. Źródła te stanowią istotne zagrożenie dla środowiska naturalnego, ze względu na ich niekiedy znaczną lokalną koncentrację [1].

Tabela 1. Emisja tlenków azotu w Polsce [3]

Źródła emisji	1990	1995	2000	2007	
	Gg NO_2 / rok				%
Energetyka zawodowa	370	377	237	249	28,1
Energetyka przemysłowa	130	111	81	101	11,7
Technologie przemysłowe	200	103	109	73	8,2
Źródła stacjonarne ^{a))}	100	115	97	113	12,7
Źródła mobilne	480	414	314	349	39,3
Ogółem	1280	1120	838	885	100,0

^{a)} kotłownie lokalne, paleniska domowe, warsztaty rzemieślnicze i inne

Większość ważniejszych źródeł emisji wydala do powietrza atmosferycznego gazy o niskim stopniu utleniania, co bardzo komplikuje rozwiązanie usuwania tlenków azotu ze spalin i z przemysłowych gazów odlotowych [1].

2. Metody usuwania tlenków azotu z gazów odlotowych – stan techniki

Stosowane w ostatnich latach metody usuwania tlenków azotu z przemysłowych gazów odlotowych można podzielić na następujące grupy [1, 6]:

- a) redukcja katalityczna – nieselektywna (NSRC) lub selektywna (SRC),
- b) adsorpcja,
- c) absorpcja – kwaśna lub alkaliczna.

Redukcja katalityczna jest efektywną, ale i bardzo kosztowną metodą oczyszczania gazów. Jest stosowana przede wszystkim w krajach wysoko uprzemysłowionych do usuwania tlenków azotu ze spalin energetycznych oraz z przemysłowych gazów odlotowych, powstających podczas produkcji kwasu azotowego. Metoda ta wymaga użycia katalizatorów oraz, jako gazów redukujących wodoru, tlenku węgla, metanu i innych węglowodorów, również amoniaku, który w obecności tlenu reaguje selektywnie z tlenkami azotu. Metoda ta nie ma w chwili obecnej większego zastosowania w Polsce, przede wszystkim z powodu znacznych nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Koszt reaktora jest w największym stopniu związany z kosztem katalizatora (a jego ilość zależy od stężenia tlenków azotu w gazach), zależy od żywotności katalizatora, od zużycia gazów redukcyjnych oraz od rocznej liczby godzin pracy w pełnym obciążeniu [1].

Mimo dużej skuteczności, metody adsorpcyjne z wykorzystaniem tradycyjnych adsorbentów, nie znalazły powszechnego zastosowania w instalacjach do usuwania tlenków azotu z przemysłowych gazów odlotowych, przede wszystkim ze względów ekonomicznych oraz ze względu na trudności związane z regeneracją adsorbentu lub utylizacją nasyconych mas chłonnych. Opracowana, na podstawie badań własnych, technologia oczyszczania gazów odlotowych z tlenków azotu na anionitach [4, 5] zalecana jest do unieszkodliwiania tlenków azotu z małych źródeł, charakteryzujących się zmienną emisją skokową. Cechuje ją bowiem bardzo duża tolerancja na stężenia tlenków azotu w gazie oczyszczanym, z zachowaniem dużej skuteczności oczyszczania, oraz prostota konstrukcji urządzeń i łatwość ich eksploatacji [1].

Metody absorpcji tlenków azotu w roztworach należą do najwcześniej wprowadzonych technologii oczyszczania przemysłowych gazów odlotowych. W metodach tych wykorzystuje się podstawowe własności tlenków azotu występujących w gazach – ich rozpuszczalność w wodzie [7-9], w roztworach kwasu azotowego [10,11] lub siarkowego [12-14], oraz zdolność do tworzenia odpowiednich soli, azotanów i azotynów, w reakcjach z substratem o charakterze alkalicznym [15-31]. Metody pochłaniania tlenków azotu w kwasach prowadzą do wytwarzania kwasu azotowego lub stężonych tlenków azotu, nie dają więc produktów ubocznych, lecz zwiększają ilość produktu zasadniczego. W większości przypadków są to nieskomplikowane, pod względem inżynierskim i chemicznym, procesy. Wspólną ich wadą jest zbyt mała szybkość wymiany masy, co w warunkach przemysłowych wymaga dużych objętości aparatów. Z metodami tymi wiąże się również wiele ważnych problemów korozyjnych, pomijanych zazwyczaj w opracowaniach dotyczących badań w skali laboratoryjnej. Metody zaś absorpcji tlenków azotu w roztworach alkalicznych odznaczają się na ogół lepszą sprawnością. Metody te zazwyczaj są bardziej kosztowne, ponieważ dają produkty, które wymagają dodatkowego postępowania technologicznego. Zapewniają jednak zmniejszenie zawartości tlenków azotu w przemysłowych gazach odlotowych do granic określonych normami sanitarnymi.

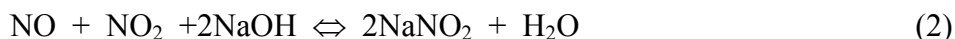
Ogólnie można powiedzieć, że metody absorpcyjne cechuje zazwyczaj uproszczony schemat technologiczny i prosta, typowa aparatura. Realizacja procesu również nie powoduje większych trudności eksploatacyjnych. Brak jest jednak w literaturze światowej niezbędnych informacji do projektowania instalacji do oczyszczania gazów odlotowych z tlenków azotu.

3. Absorpcja alkaliczna tlenków azotu

Wykorzystanie procesu absorpcji alkalicznej w celach ochrony środowiska determinowane jest własnościami fizykochemicznymi tlenku i ditlenku azotu. Ditlenek azotu, w porównaniu z tlenkiem azotu, odznacza się dostatecznie dużą rozpuszczalnością i reaktywnością z wodą oraz z wodnymi roztworami alkalicznymi, w związku z czym może być absorbowany w roztworach [1, 6, 15-17, 29]. Tlenek azotu natomiast jest słabo rozpuszczalny w wodzie i odznacza się niewielką reaktywnością z roztworami alkalicznymi. Aby usunąć tlenek azotu z gazów metodą absorpcji w roztworach, należy utlenić go do ditlenku azotu zgodnie z reakcją:



Wiadomo, że jeśli w mieszaninie NO i NO₂ stosunki objętościowe tych dwóch tlenków będą się kształtować tak, że objętość tlenku azotu będzie równa lub mniejsza od objętości ditlenku azotu to, w wyniku zetknięcia się z roztworem alkalicznym, np. z wodorotlenkiem sodowym, nastąpi łączna absorpcja obu tlenków zgodnie z reakcją:



Przy nadmiarze ditlenku azotu, oprócz procesów opisanych równaniem (2), nastąpi połączenie ditlenku azotu z wodorotlenkiem sodowym, zgodnie z reakcją:



Przy nadmiarze tlenku azotu w reakcję (2) wejdzie tylko równoważna ditlenkowi azotu ilość cząsteczek tlenku azotu, natomiast pozostałe cząsteczki tlenku azotu nie połączą się z wodorotlenkiem sodowym i pozostaną w fazie gazowej.

Atroščenko stwierdził, że absorpcji w roztworach alkalicznych ulega zdecydowanie najszybciej mieszanina tlenków azotu o stosunku objętościowym ditlenku azotu do tlenku azotu większym lub równym jedności [15]. Potwierdził to w badaniach Głowiński ze współpracownikami [29]. Wpływ stężenia i rodzaju cieczy absorpcyjnej na szybkość absorpcji tlenków azotu badał Kuznecov [16]. Stwierdził on, że zmiana początkowego stężenia badanych roztworów od 10 do 100 g/dm³ zwiększa szybkość absorpcji 4-5 razy. W badaniach własnych [1, 22] ustalono następujący malejący szereg aktywności roztworów alkalicznych, użytych do absorpcji tlenków azotu:



Wpływ stężenia roztworu absorpcyjnego na proces absorpcji tlenków azotu był różny dla zbadanych roztworów. I tak, dla roztworu wodorotlenku sodowego obserwowano gwałtowne oddziaływanie stężenia roztworu na sprawność absorpcji do wartości 2% mas., a dla roztworu węglanu sodowego do wartości 10% mas. [1, 22].

Mechanizm procesu absorpcji tlenków azotu w roztworach alkalicznych badali również Aoki [30] i Carta [31]. Określili oni szybkość absorpcji tlenków azotu w roztworach wodorotlenku sodowego oraz wpływ jonów azotynowych na proces absorpcji.

3.1. Absorpcja alkaliczna tlenków azotu z substancjami utleniającymi

Problem podniesienia stopnia utleniania tlenków azotu usiłowano rozwiązać przez absorpcję z równoczesnym utlenieniem tlenku azotu związkami, łatwo oddającymi tlen w fazie ciekłej. Jako przydatne do tych celów brano m.in. związki o silnie utleniających właściwościach, jak podchloryn sodowy [1, 4, 5, 18, 22], chloryn sodowy [18, 19, 27, 28], podchloryn wapniowy [32], nadmanganian potasowy i dwuchromian potasowy [1, 22, 33, 34, 37], sole żelaza, miedzi, niklu i kobaltu [1, 22, 35, 36] oraz nadtlenek wodoru [1, 22, 25, 37].

Badania absorpcji tlenków azotu w alkalicznych roztworach podchlorynu sodowego przedstawiono w pracach własnych [1, 4, 5, 22]. Doświadczenia prowadzono w płuczce barbotażowej. Stwierdzono, że stopień absorpcji tlenków azotu wynosi ponad 90%, a sam proces przebiega prawie ze stechiometryczną pojemnością sorpcyjną roztworu [1, 4].

Mechanizm i kinetykę procesu absorpcji NO_x w alkalicznych roztworach chlorynu sodowego badał Sada [18, 19]. Stwierdził on, że stałe szybkości reakcji zmniejszają się wykładniczo wraz ze stężeniem NaOH . Zbyt małe natomiast stężenie jonów wodorotlenowych powoduje rozkład chlorynu sodowego do gazowego dwutlenku chloru, który następnie w fazie gazowej utlenia tlenek azotu. Sada uważał, że aby powstrzymać rozkład NaClO_2 i zapewnić cieczy absorpcyjnej stałą zdolność utleniającą, należy utrzymać stężenie jonów wodorotlenowych na stałym poziomie. Proponuje więc używać trudno rozpuszczalnych wodorotlenków alkalicznych $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lub $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Możliwość zastosowania roztworów podchlorynu wapniowego o stężeniu 3-15 g/dm³ do usuwania tlenków azotu z gazów odlotowych przedstawił Furuta [32]. Autor uzyskiwał 95-100% sprawność oczyszczania gazów z tlenków azotu.

Lukjanica [37] badała kinetykę reakcji tlenku azotu w wodnych roztworach nadmanganianu potasu, dwuchromianu potasu i nadtlenku wodoru w temperaturach 293 K i 343 K, w zależności od stężenia utleniacza i pH roztworu.

Na możliwość wykorzystania nadtlenku wodoru w procesie alkalicznej absorpcji tlenków azotu wskazano w pracy [38]. Na podstawie badań laboratoryjnych w kolumnie z wypełnieniem autor stwierdził, że wpływ dodatku nadtlenku wodoru, do roztworu alkalicznego, na stopień absorpcji jest niewielki (od 4,5 do 9%), co jednak pozwala oczyścić gazy zawierające 0,5-1,0% obj. tlenków azotu ze sprawnością 85-95%.

Duże zainteresowanie wzbudziła możliwość usuwania tlenków z gazów odlotowych w roztworach alkalicznych (NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$), z zastosowaniem jako utleniacza w fazie gazowej ozonu [39] lub dwutlenku chloru [40]. Divom stwierdził, że zastosowanie ozonu w procesie absorpcji tlenków azotu gwarantuje wysoki stopień absorpcji przy stosunkowo niedużym zużyciu ozonu [39]. Wyraźny efekt daje zastosowanie ozonu w absorpcji tlenków azotu o małym stężeniu. Właściwym aparatem w tym procesie jest kolumna z wypełnieniem. W związku z bardzo dużą szybkością utleniania, dwutlenek chloru dodaje się do gazów bezpośrednio przed kolumną absorpcyjną [39]. Stopień absorpcji, przy prędkościach gazu około 4 m/s, przekracza 95%.

W niniejszej pracy przedstawiono badania zmierzające do ustalenia istotnych parametrów procesu usuwania tlenków azotu z gazów w kolumnie z wypełnieniem zraszaną alkalicznym roztworem z dodatkiem podchlorynu sodowego.

4. Wyniki badań

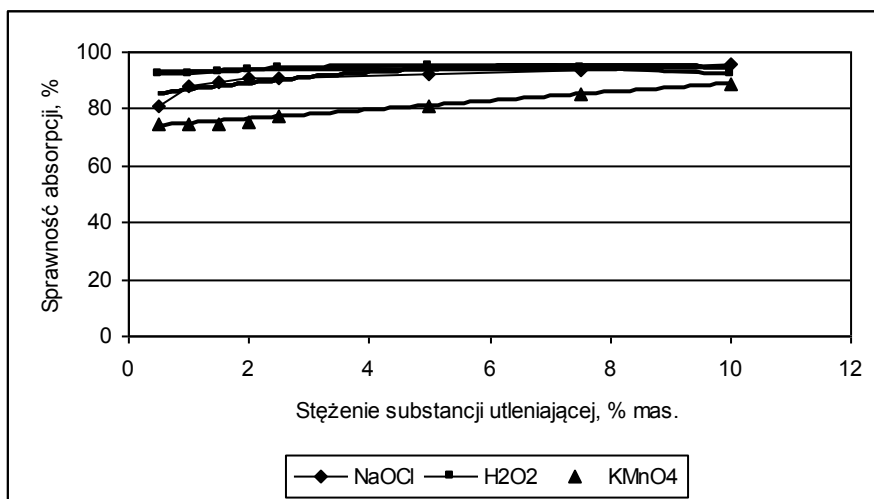
Badania usuwania tlenków azotu z gazów przeprowadzono w instalacji opisanej w pracy [1]. Doświadczenia prowadzono w kolumnie z wypełnieniem o wysokości 1 m i średnicy 0,025 m, przy następujących parametrach zmiennych:

- strumień objętościowy gazu $(4,9-49,0) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,
- prędkość gazu 0,1-1,0 m/s,
- stężenie początkowe NO_x (w przeliczeniu na NO_2) w gazie 1-10 g/m^3 ,
- strumień objętości roztworu zraszającego $(6,8-54,4) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$,
- gęstość zraszania 5-40 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$,

dla różnych rodzajów wypełnień oraz różnych rodzajów i stężeń roztworu zraszającego. W czasie eksperymentów, dla danego rodzaju wypełnienia oraz rodzaju i stężenia roztworu zraszającego, utrzymywano na stałym poziomie strumień objętości gazu, natomiast zmieniano stężenie początkowe NO (w przeliczeniu na NO_2) w gazie i strumień objętości roztworu zraszającego. W przebadanym zakresie parametrów zmiennych wynik stanowią wartości średnie z 3 pomiarów.

W doświadczeniach sprawdzano możliwość zwiększenia sprawności absorpcji tlenków azotu w roztworze wodorotlenku sodowego [1] o stężeniu 5% mas. przez dodatek do roztworu zraszającego substancji utleniających: NaOCl , H_2O_2 i KMnO_4 . Badania te miały ponadto określić wpływ podstawowych parametrów procesu, takich jak prędkość gazu, stężenie tlenków azotu w gazie, stężenie substancji utleniającej w roztworze zraszającym i gęstość zraszania, na sprawność absorpcji tlenków azotu w roztworach alkalicznych z substancjami utleniającymi.

Wpływ dodatku substancji utleniającej do roztworu wodorotlenku sodowego na sprawność absorpcji tlenków azotu pokazano na rys.1.

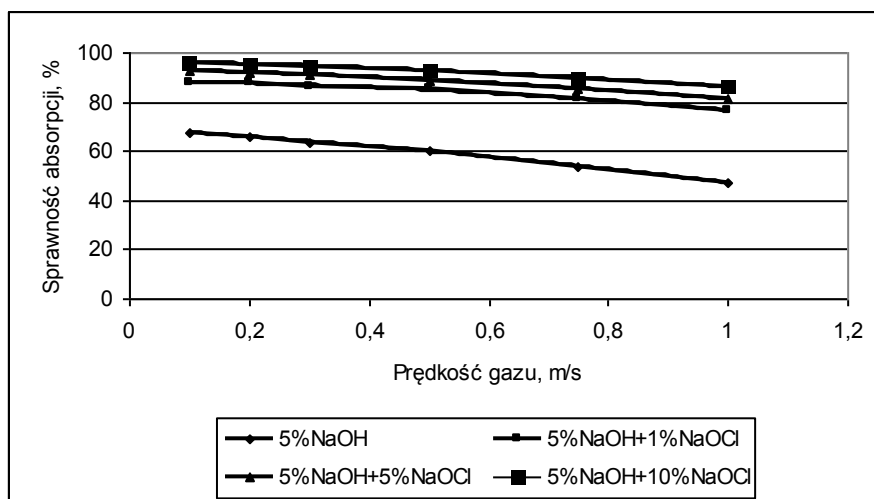


Rys. 1. Wpływ dodatku substancji utleniającej w 5% roztworze wodorotlenku sodowego na absorpcję tlenków azotu, przy stałym stężeniu początkowym NO_x w gazie ($3,5 \text{ g}/\text{m}^3$), prędkości gazu (0,2 m/s) i gęstości zraszania ($20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$)

Stężenie substancji utleniającej w 5% roztworze wodorotlenku sodowego zmieniano w przedziale od 0,5 do 10% mas. W czasie trwania eksperymentu, dla danego rodzaju roztworu zraszającego, utrzymywano na stałym poziomie prędkość gazu (0,2 m/s), gęstość zraszania ($20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$) oraz stężenie początkowe NO_x w gazie oczyszczanym ($3,5 \text{ g}/\text{m}^3$). Z wykresu

widać, że w przebadanym zakresie sprawność absorpcji tlenków azotu wzrastała w miarę zwiększania stężenia substancji utleniającej, przy czym najbardziej widoczny wpływ wykazuje nadtlenek wodoru, potem podchloryn sodowy i nadmanganian potasowy. Wpływ stężenia podchlorynu sodowego jest szczególnie widoczny do wartości 2% mas., powyżej tej wartości zależność jest liniowa (podobnie jak dla nadtlenku wodoru i nadmanganianu potasu), przy czym dalszy wzrost stężenia podchlorynu sodowego powoduje nieznaczny wzrost sprawności procesu.

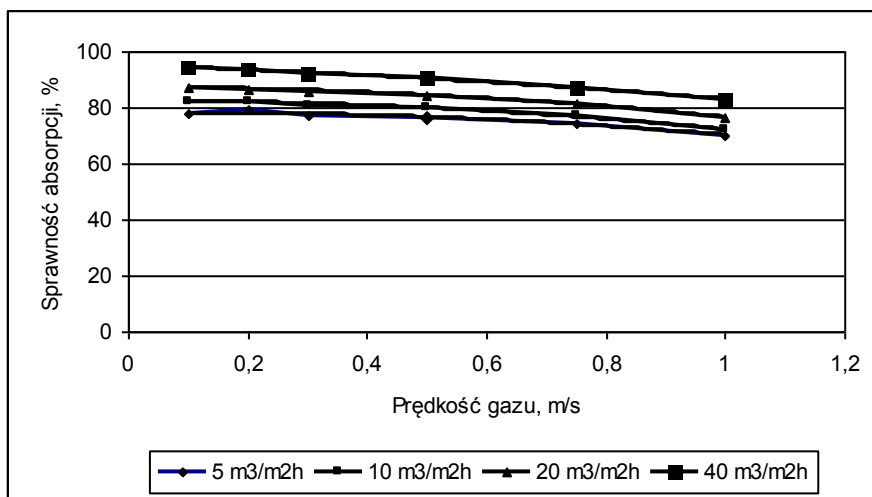
Wpływ prędkości gazu na sprawność absorpcji tlenków azotu w roztworach utleniających o różnej zawartości substancji utleniającej (na przykładzie podchlorynu sodowego) przedstawiono na rys. 2.



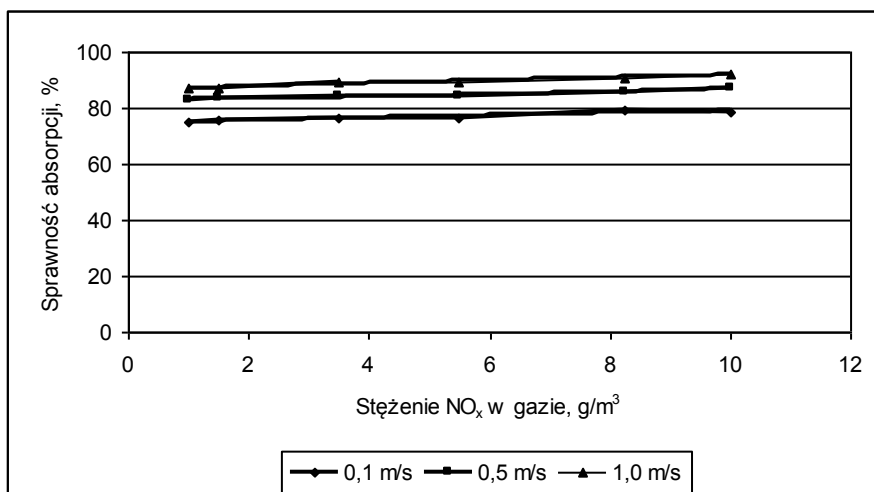
Rys. 2. Zależność sprawności absorpcji tlenków azotu od prędkości gazu dla roztworów absorpcyjnych o różnej zawartości podchlorynu sodowego, przy stałym stężeniu początkowym NO_x w gazie ($3,5 \text{ g/m}^3$), prędkości gazu ($0,2 \text{ m/s}$) i gęstości zraszania ($20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$)

Analizując przedstawione wykresy zauważono, że sprawność procesu maleje w miarę zwiększania się prędkości gazu, a charakter tych krzywych jest podobny dla wszystkich rodzajów roztworu zraszającego. Z rys. 2 widać również w jakim stopniu dodatek podchlorynu sodowego do roztworu podstawowego, 5% wodorotlenku sodowego, wpływa na poprawę skuteczności oczyszczania gazu z tlenków azotu. I tak, przykładowo, zastosowanie podchlorynu sodowego o stężeniu 1% mas., przy prędkości gazu $0,2 \text{ m/s}$ zwiększa sprawność absorpcji o 21,4%, zaś przy prędkości gazu $0,8 \text{ m/s}$ zwiększa sprawność procesu o 27%.

Z zależności przedstawionych na rys. 3 można zaobserwować, że zwiększanie gęstości zraszania poprawia sprawność absorpcji tlenków azotu w alkalicznym roztworze podchlorynu sodowego o 4-6%. Wpływ początkowego stężenia NO_x w oczyszczanym gazie na skuteczność procesu pokazano na rys. 4. Wraz ze wzrostem stężenia NO_x w gazie wzrasta liniowo sprawność procesu, jednak wzrost skuteczności usuwania tlenków azotu jest nieznaczny.



Rys. 3. Zależność sprawności absorpcji tlenków azotu od prędkości gazu dla różnych gęstości zraszania 5%. roztworem wodorotlenku sodowego z dodatkiem 1% podchlorynu sodowego, przy stałym stężeniu początkowym NO_x w gazie $3,5 \text{ g/m}^3$



Rys. 4. Zależność sprawności absorpcji tlenków azotu od stężenia tlenków azotu w gazie dla różnych prędkości gazu, przy stałej gęstości zraszania 5%. roztworem wodorotlenku sodowego z dodatkiem 1% podchlorynu sodowego $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$

Zastosowanie w kolumnie różnych wysokości i rodzajów wypełnień potwierdziło wcześniej obserwowaną zależność [1], że sprawność procesu absorpcji wzrasta wraz ze wzrostem czasu kontaktu gazu z roztworem absorpcyjnym. Wprowadzenie zraszania między warstwami wypełnienia oraz wypełnienia o zwiększonej powierzchni właściwej poprawia o kilka procent sprawność procesu [1, 13, 22]. Ograniczeniem w stosowaniu wypełnień o zwiększonej powierzchni właściwej są jedynie opory przepływu gazu, rzutujące na aspekt ekonomiczny zastosowania instalacji do oczyszczania przemysłowych gazów odlotowych.

Badania technologiczne w warunkach przemysłowych, które opisano w pracy [5] potwierdzają, że sprawność absorpcji tlenków azotu nie zależy od stężenia NaOH w roztworze sorpcyjnym, natomiast stężenie NaOCl istotnie wpływa na sprawność absorpcji tlenków azotu. Zużycie roztworu sorpcyjnego do zaabsorbowania 1 kg NO_x (w przeliczeniu na NO_2) wynosiło odpowiednio 1,645 kg NaOCl i 0,891 kg NaOH.

Spośród ogólnie przyjętych sposobów ujęcia procesu wymiany masy zdecydowano się na ilościowy opis procesu wymiany masy, z ujęciem tzw. sprawności absorpcji. Wielkość ta bowiem w bardzo prosty i przejrzysty sposób pozwala ocenić wpływ podstawowych parametrów procesu na skuteczność oczyszczania gazów. Przyjęto, że sprawność absorpcji jest funkcją następujących zmiennych:

$$\eta = f (w_{og}, L, c_{og}, c_r), \quad (4)$$

gdzie η – sprawność absorpcji, %,
 w_{og} – prędkość gazu liczona na pusty przekrój kolumny, m/s,
 L – gęstość zraszania roztworem absorpcyjnym, $m^3/(m^2 h)$,
 c_{og} – stężenie początkowe NO_x (w przeliczeniu na NO_2) w gazie, g/m^3 lub % obj.,
 c_r – stężenie roztworu absorpcyjnego, kg/m^3 lub % mas.

Dla przebadanego zakresu parametrów zmiennych uzyskane wyniki opracowano w formie wykresów jako funkcje:

$$\eta = f(w_{og}), \quad \eta = f(L), \quad \eta = f(c_{og}), \quad \eta = f(c_r). \quad (5)$$

Analizując wyniki badań, przedstawione w formie wykresów, efektywność wymiany masy opisano w postaci funkcji:

$$\eta = 1 - \exp [- f (zmiennie procesu)]. \quad (6)$$

W rozpatrywanym przypadku uzyskano zależność:

$$\eta = 1 - \exp [- f (w_{og}, L, c_{og}, c_r)]. \quad (7)$$

Dla równania (7) zaproponowano, jako najodpowiedniejszą, następującą postać funkcyjną:

$$\eta = 1 - \exp [-B_o (w_{og})^{B_1} (L)^{B_2} (c_{og})^{B_3} (c_r)^{B_4}], \quad (8)$$

gdzie współczynniki B_i wyznaczono metodą liniowej regresji wielokrotnej.

W przebadanym zakresie parametrów zmiennych, dla absorpcji tlenków azotu w alkalicznych roztworach podchlorynu sodowego, określono zależność:

$$\eta = 1 - \exp [-0,682 (w_{og})^{-0,152} (L)^{0,229} (c_{og})^{0,068} (c_r)^{0,033}], \quad (9)$$

dla której współczynnik korelacji wielokrotnej $R = 0,88$, a błąd średni wynosi 4,91%.

5. Podsumowanie

Zaprezentowane badania absorpcji tlenków azotu w roztworach alkalicznych z substancjami utleniającymi pozwalają określić wpływ zmian podstawowych parametrów procesu, takich jak prędkość gazu, stężenie tlenków azotu w gazie, stężenie i rodzaj roztworu oraz gęstość zraszania, na proces oczyszczania gazu.

Zebrany materiał doświadczalny weryfikuje doniesienia literaturowe i dostarcza niezbędnych informacji do projektowania instalacji do oczyszczania gazów z tlenków azotu.

Literatura

1. Kuropka J.: Oczyszczanie gazów odlotowych z tlenków azotu. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska nr 62, seria Monografie nr 30, Wrocław 1988
2. Juda-Rezler K.: Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
3. Materiały i opracowania statystyczne GUS, Ochrona Środowiska, Warszawa 2005
4. Gostomczyk M.A., Kuropka J.: Opracowanie technologii oczyszczania gazów odlotowych powstałych w procesie trawienia metali kwasem azotowym. Cz.I. Raport Inst. Inż. Ochr. Środow. Pwr. nr 321, 1978
5. Gostomczyk M.A., Kuropka J.: Opracowanie technologii oczyszczania gazów z NO_x powstałych w procesach nitracyjnych. Cz. II. Raport Inst. Inż. Ochr. Środow. PWR. nr 31, 1979
6. Rentz O., Ribeiro J.: ECE NO_x Task Force Operating Experience with NO_x Abatement at Stationary Sources. IIP, Karlsruhe 1992
7. Komiyama H., Inoue H.: Absorption of Nitrogen into Water. Chem. Engng. Sci., 1980, 35 (1-2), 154-161
8. Weisweiler W. i in., Einsatz eines Strahldüsenreaktors für die Absorption von Stickstoffdioxid in Wasser. Chem. Ing. Tech. 1981, 53(2), 124-125.
9. Joshi J. i in.: Absorption of NO_x Gases. Chem.Eng. Commun., 1985, 33, 1-92
10. Lefers J. B., Berg P. J.: Absorption of NO₂/N₂O₄ into diluted and concentrated nitric acid. Chem. Engng. Journal, 1982, 23, 211-221
11. Weisweiler W. i in.: Absorption of NO₂ / N₂O₄ in Nitric Acid. Chem. Eng. Technol. 1990, 13, 97-101
12. Gostomczyk M.A., Kuropka J., Sosnowski M.: On the Removal and Reuse of Nitric Oxides from Process Gases of Sulphuric Acid Production. Environ. Prot. Eng., 1986, vol. 12, nr 2, 91-98
13. Kuropka J., Gostomczyk M.A.: Absorption of Nitrogen Oxides. Acidic Absorbents. Environment Protection Engineering 1990, vol. 16, nr 1, 75-84
14. Greve A., Bode J.: Absorption von NO_x in einer Salpetersäure-Kolonnen. Chem.-Ing.-Tech., 1994, 66 (2), 220-223.
15. Atroščenko V. I., Kargin S. J.: Technologija azotnoj kisloty. Moskva, Izd. Goschimizdat, 1962
16. Kuznecov I.E., Lunjaka K.V.: Kinetyka absorpcii okislov azota vodnymi ščeločnymi rastvorami. IVUZ Chim. i Chim. Technologia, 1973, 16 (7), 1069-1074
17. Kobayashi H., Takezawa N., Niki T.: Removal of Nitrogen Oxides with Aqueous Solutions of Inorganic and Organic Reagents. Environ. Sci. Technol., 1977, 11 (2), 190-192
18. Sada E. i in., Absorption of NO in aqueous mixed solutions of NaClO₂ and NaOH. Chem. Eng. Sci., 1978, 33, 315-318
19. Sada E. i in., Absorption of lean NO in aqueous slurries of Ca(OH)₂ with NaClO₂ or Mg(OH)₂ with NaClO₂. Chem. Eng. Sci. 1979, 34, 719-724.
20. Carta G.: Role of HNO₂ in the Absorption of Nitrogen Oxides in Alkaline Solutions. Ind. Eng. Chem. Fundam. 1984, 23(2), s.260-264.
21. Deiß K., Weisweiler W.: Einfluß gelöster Inertsalze auf die Absorption der Stickoxid-Komponenten N₂O₄ und N₂O₃ in wäßrigen Lösungen. Chem.-Ing.-Tech. 1986, 58(1), s.64-65.

22. Kuropka J., Gostomczyk M.A.: Absorption of Nitrogen Oxides. Alkaline Absorbents. Environment Protection Engineering 1990, vol.16, nr 1, s.85-98.
23. Suchak N., Jethani K., Joshi J.: Absorption of Nitrogen Oxides in Alkaline Solutions: Selective Manufacture of Sodium Nitrite. Ind. Eng. Chem. Res. 1990, 29(7), s.1492-1502.
24. Shi Y. i in.: Removal of Nitric Oxide from Flue Gas with Iron Thiochelat Aqueous Solution in a Turbulent Contact Absorber. Environmental Progress 1996, 13(3), s.153-158.
25. Thomas D., Vandeschuren J.: The Absorption-Oxidation of NO_x with Hydrogen Peroxide for the Treatment of Tail Gases. Chemical Engineering Science 1996, 51(11), s.2649-2654.
26. Aoki M. i in.: Simultaneous absorption of NO and NO₂ into alkaline solutions. J.Chem. Eng. Jpn 1982, 15(5), 362-367.
27. Brogren Ch., Karlsson H., Bjerle I.: Absorption of NO in an Aqueous Solution of NaClO₂. Chem. Eng. Technol. 1998, 21(1), 61-70.
28. Chu H., Chien T., Twu B.: Simultaneous absorption of SO₂ and NO in a stirred tank reaktion with NaClO₂ / NaOH solutions. Water, Air and Soil Pollution 2003, 143,337-350.
29. Głowiński J., Biskupski A., Słonka T., Tylus W.: Absorption of nitrogen oxides at the final stage of ammonium nitrite production. Chemical and Process Eng., 2009, 30, 217-229
30. Aoki M. i in.: Simultaneous absorption of NO and NO₂ into alkaline solutions. J.Chem. Eng. Jpn., 1982, 15 (5), 362-367
31. Carta G.: Role of HNO₂ in the Absorption of Nitrogen Oxides in Alkaline Solutions. Ind. Eng. Chem. Fundam. 1984, 23 (2), 260-264
32. Furuta I. i in.: The nitrogen oxide removal from waste gas by scrubbing with calcium and magnesium hypochlorites. Pat. JP nr 36372, 1975
33. Pollo I. i in.: Absorbicija oksidi azota v rastvorach chromatov pri raznyh znjaznjach pH. Inf. Zaščita Atmosfery, 1985, 1, 76-79
34. Chu H., Chien T., Li S.: Simultaneous absorption of SO₂ and NO from flue gas with KMnO₄ / NaOH solutions. Sci. Total Environ., 2001, 275, 127-135
35. Sada E. i in.: Absorption of nitric oxide in aqueous ferrous sulfate solutions. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 1978, 17 (3), 321-324
36. Shi Y. i in.: Removal of Nitric Oxide from Flue Gas with Iron Thiochelat Aqueous Solution in a Turbulent Contact Absorber. Environment. Progress 1996, 13 (3), 153-158
37. Lukjanica A. i in.: Reaction of nitric oxide with aqueous solutions of oxidizing agents. Tr. Mis. Chim. Technol. Instituta, 1972, 69, 226-267
38. Dimov V. i in., Intensifikacija absorbcii oksidov azota v ščeločnych rastvorach i azotnoj kislote nasledstvom perekisi vodoroda. Inf. Zaščita Atmosfery, 1984, 1, 114-120
39. Dimov V., Krystev I., Techniko-ekonomičeskaja ocenka metoda intensifikacii absorbcii azotnych oksidov posredstvom ozona. Inf. Zaščita Atmosfery, 1986, 2, 131-133
40. Uchijama H. i in.: Verfahren zur gleichzeitigen Entfernung von Stickstoffoxiden und Schwefeloxiden aus Abgasen. Pat. RFN nr 2737398, 1978.