

Krzysztof Krotla, Tadeusz Wala, Piotr Brudziana, RAFAKO S.A.

URZĄDZENIA TYPU SCR

- porównanie nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacji urządzeń - II część

■ Koszty inwestycyjne SCR w zależności od poziomu redukcji NO_x

W artykule przedstawiona została charakterystyka kosztów urządzenia SCR w zależności od stopnia redukcji NO_x. Koszty zostały zestawione na podstawie symulacji dla średniej wielkości kotła opalanego węglem kamiennym. W przykładzie posłużono się danymi kotła typu OP 650 o wydajności 650 t pary na godzinę. Założono przypadki redukcji poziomu NO_x z 600, 450 oraz 350 mg/Nm³ do 190

mg/Nm³ względnie z 600 mg/Nm³ do 100 mg/Nm³. Dane wyjściowe zostały zestawione w tab. 1.

Nie wszystkie koszty urządzenia SCR zależne są od stopnia redukcji NO_x. Dla przykładu, przewody spalinowe, transportujące w każdym z wariantów tę samą ilość gazu, nie zmieniają swojej ceny. Podobnie systemy sterowania czy też analizy gazu są dla każdego wariantu identyczne.

Przy porównaniu cen wariantów szczegółowej analizie poddano te podzespoły systemu, które zależne są od stopnia redukcji NO_x.

□ Katalizatory

Wyższy stopień redukcji NO_x wymaga zainstalowania większej objętości katalizatorów. Wzrost redukcji NO_x z 160 mg/m³ do 500 mg/m³, czyli praktyczne potrojenie odazotowania powoduje zwiększenie kosztów katalizatorów o 64%.

□ Reaktor

Aby zainstalować większą ilość katalizatorów musi zostać zwiększona kubatura reaktora, w którym znajdują się łoża katalityczne. W symulowanym przykładzie między wariantem obliczeniowym 1 i 3 wystarcza zwiększenie wysokości reaktora. W wariantcie 4 konieczne jest również powiększenie przekroju.

□ Stacja rozładunku i magazynowania wody amoniakalnej

Zwiększenie stopnia redukcji NO_x ma wpływ na zużycie środka redukcyjnego, w symulowanym przykładzie wody amoniakalnej, a przez to również na koszt stacji rozładunku i magazynowania. Największy wpływ na koszty ma kubatura zbiornika wody amoniakalnej. W symulowanym przykładzie założono zastosowanie przynajmniej 2 zbiorników (ze względu na dyspozycyjność urządzenia) z wymaganą rezerwą 2 tygodni zapotrzebowania. W wariantcie 4 konieczne było zaplanowanie 3 zbiorników, a przez to również uwzględnienie dodatkowego oprzyrządowania.

Tab. 1. Dane wyjściowe

| Opis | Jednostka | Dane | | | |
|---|--------------------|---------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Obciążenie kotła | %WMT | 100% | | | |
| Ilość spalin | Nm ³ /h | 728 500 | | | |
| Temperatura spalin na wlocie do katalizatora | °C | 380 | | | |
| Amoniak nie przereagowany (slip ammonia) | mg/Nm ³ | 2 | | | |
| Wariant obliczeniowy | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Zawartość NO _x w spalinach na wlocie (6% O ₂ , spaliny suche) | mg/Nm ³ | 350 | 450 | 600 | 600 |
| Zawartość NO _x w spalinach odazotowanych (6% O ₂ , j.w.) | mg/Nm ³ | 190 | 190 | 190 | 100 |
| Stopień redukcji NO _x | % | 46% | 58% | 68% | 83% |
| Redukcja absolutna | mg/Nm ³ | 160 | 260 | 410 | 500 |

□ Pozostałe koszty urządzenia SCR

Podlegają one tylko w niewielkim stopniu zmianom w przypadku podwyższenia stopnia redukcji NO_x . W zestawieniu całościowych kosztów uwzględniona została różnica ok. 10% między wariantem 1 i 4.

□ Zestawienie kosztów inwestycyjnych

W tab. 2 zestawione zostały sumaryczne koszty inwestycyjne dla analizowanego urządzenia SCR. W przypadku modernizacji istniejącego kotła dużą rolę w poziomie kosztów SCR odgrywają specyficzne lokalne warunki, stojące do dyspozycji wolne powierzchnie, konieczność przebudowy lub przesunięcia istniejących systemów itp. Z tego względu trudno jest zdefiniować uniwersalną wysokość inwestycji.

Przy kalkulacji kosztów inwestycyjnych dla wariantu 1 założony został przeciętny nakład na tego typu instalację. Wzrost kosztów inwestycyjnych dla wariantów 2-4 odpowiada przeprowadzonej szczegółowej analizie.

■ Koszty eksploatacji SCR w zależności od poziomu redukcji NO_x

Koszty eksploatacyjne są w niniejszym referacie analizowane na podstawie wartości zużywanych zasobów i mediów, takich jak energia elektryczna, para wodna czy też woda amoniakalna oraz kosztów części zamiennych. W tym drugim przypadku uwzględnione zostały wyłącznie koszty wymiany i regeneracji katalizatorów jako jedyne podzespołu urządzenia SCR ulegającego wymiernemu zużyciu. Nie zostały również uwzględnione koszty obsługi urządzenia oraz koszty finansowania inwestycji.

Przy symulacji kosztów eksploatacji przyjęto następujące założenia: woda amoniakalna 0,45 zł/kg, para grzewcza 15 zł/t oraz energia elektryczna 018 zł/kWh.

Tab. 2. Sumaryczne koszty inwestycyjne dla analizowanego urządzenia SCR

| Opis | Jednostka | Dane | | | |
|--|--------------------|---------|--------|--------|--------|
| Obciążenie kotła | %WMT | 100% | | | |
| Ilość spalin | Nm ³ /h | 728 500 | | | |
| Temperatura spalin na wlocie do katalizatora | °C | 380 | | | |
| Amoniak nieprzereagowany (slip ammonia) | mg/Nm ³ | 5 | | | |
| Wariant obliczeniowy | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Redukcja absolutna | mg/Nm ³ | 160 | 260 | 410 | 500 |
| Koszt inwestycyjny instalacji SCR | tys. PLN | ~30.000 | 32.250 | 34.000 | 35.750 |
| Wzrost kosztów inwestycyjnych | tys. PLN | - | 2.250 | 4.000 | 5.750 |
| Wzrost kosztów inwestycyjnych | % | - | 7,5% | 13% | 19% |

□ Eksploatacja katalizatorów

W trakcie eksploatacji katalizatory tracą część swojej aktywności. Proces ten spowodowany jest w pierwszym rzędzie następującymi zjawiskami: akumulacją osadów siarczanu amonu, blokadą związkami litowców i berylowców (K, Na, Mg, Ca), blokadą związkami metali ciężkich i fosforu oraz akumulacją pyłu.

Do dwóch oryginalnie zainstalowanych warstw katalizatora dodawana jest po 32 tysiącach godzin eksploatacji trzecia, dodatkowa warstwa. Dopiero po okresie 86 tysięcy godzin potrzebny jest następne uzupełnienie brakującej aktywności. Uzupełnienie to może nastąpić w wyniku wymiany zużytych katalizatorów lub przez ich regenerację. Dzięki postępom techniki regeneracji większość dezaktywacji może zostać zniwelowana bez konieczności wymiany katalizatorów. Koszty regeneracji kształtują się na poziomie 25-50% oryginalnej ceny dostawy. W symulowanym przykładzie założone zostało, że po zainstalowaniu wszystkich trzech warstw każda z nich będzie dwa razy regenerowana, a następnie wymieniona.

□ Zużycie wody amoniakalnej

Woda amoniakalna dostarcza NH_3 potrzebne w reakcji redukcji NO_x . W przypadku technologii SCR cały wprowadzony do spalin amoniak wykorzystywany w procesie chemicznym. Jedyne niewykorzystaną ilością amoniaku jest tzw. slip, wynoszący 1 do 5 mg/m³. Dlatego koszty wody amoniakalnej są funkcją ilości zredukowanego NO_x .

□ Zużycie energii

Przy eksploatacji urządzenia SCR energia potrzebna jest do: wyparowania wody amoniakalnej, do odparowania wykorzystywana jest para wodna niskiej jakości, dodatkowej mocy na przetłaczanie spalin, wytworzenia i podgrzania strumienia powietrza do rozcieńczenia amoniaku przed wprowadzeniem do spalin oraz eksploatacji pomp wody amoniakalnej i zdmuchiwaczy parowych.

■ Porównanie kosztów metod pierwotnych i wtórnych

W następującym zestawieniu porównane zostały koszty osiągnięcia wy-

Tab. 3. Sumaryczne zestawienie kosztów eksploatacji urządzenia SCR dla rozpatrywanych wariantów redukcji NO_x

| Opis | Jednostka | Dane | | | |
|---|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Wariant obliczeniowy | | | | | |
| Redukcja absolutna | mg/m ³ | 160 | 260 | 410 | 500 |
| Zużycie wody amoniakalnej (25% NH ₃) | kg/h | 190 | 305 | 480 | 580 |
| Dodatkowe zapotrzebowanie mocy na przetwarzanie spalin | kW | 190 | 195 | 205 | 212 |
| Zużycie pary | kg/h | 300 | 450 | 675 | 800 |
| Koszty eksploatacyjne dla 20-letniego okresu obliczeniowego | tys. zł | ~28.000 | ~37.000 | ~48.000 | ~57.000 |
| Wzrost kosztów eksploatacyjnych | % | - | 29% | 70% | 100% |

Tab. 4. Sumaryczne zestawienie łącznych kosztów inwestycyjnych i eksploatacji urządzenia SCR dla rozpatrywanych wariantów redukcji NO_x

| Opis | Jednostka | Dane | | | |
|---|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Wariant obliczeniowy | | | | | |
| Redukcja absolutna | mg/m ³ | 160 | 260 | 410 | 500 |
| Koszt inwestycyjny instalacji SCR | tys. zł | ~30.000 | 32.250 | 34.000 | 35.750 |
| Koszty eksploatacyjne dla 20 letniego okresu obliczeniowego | tys. zł | ~28.000 | ~37.000 | ~48.000 | ~57.000 |
| Sumaryczne koszty | tys. zł | ~58.000 | ~69.250 | ~82.000 | ~92.750 |

maganego poziomu redukcji NO_x przy pomocy metod pierwotnych w połączeniu z metodą SCR, metod pierwotnych w połączeniu z metodą SNCR oraz kosztów obniżenia emisji tylko przy pomocy SCR. Do porównania przyjęto założenia cenowe dotyczące metod pierwotnych i metody SNCR (tab. 5).

■ Rozpatrzone przypadki

□ Kocioł, w którym nie dokonano jeszcze żadnych modyfikacji

Emisje o wysokości 600 mg/m³ muszą zostać zredukowane do poziomu 190 mg/m³. Możliwe warianty postępowania:

- Instalacja palników niskoemisyj-

nych redukujących do poziomu 350 mg/m³, a następnie SNCR z redukcją do 190 mg/m³. Koszt sumaryczny: 27.250 + 41.000 = 68.250 tys. zł.

- Przy pomocy metody SCR - koszt sumaryczny: 82.000 tys. zł.
- Instalacja palników niskoemisyjnych redukujących do poziomu 450 mg/m³, a następnie SCR z redukcją do 190 mg/m³. Koszt sumaryczny: 23.250 + 69.250 = 92.500 tys. zł.

Wynik tego porównania przynosi następujące rezultaty:

- Jeżeli dla danego kotła możliwa jest redukcja emisji metodami pierwotnymi do poziomu 350 mg/Nm³

lub poniżej tej wartości, najniższy sumaryczny koszt osiągnięcia obowiązujących limitów może zostać zrealizowany przy pomocy kombinacji z metodą SNCR.

Należy jednak podkreślić, że takie postępowanie niesie ze sobą podwójne ryzyko związane z granicznymi wartościami osiągalnymi metodami pierwotnymi oraz SNCR (46%).

Koszty poniesione w wyniku awarii i zatrzymań bloku, przekroczenia zawartości NH₃ w popiele lub obniżenia sprawności kotła nie zostały w tym zestawieniu uwzględnione, gdyż są trudne do oszacowania z uwagi na brak doświadczeń eksploatacyjnych w tej kombinacji metod trwale uzyskującej poziom redukcji NO_x poniżej 200 mg/Nm³.

- Jeżeli nie jest możliwe osiągnięcie poziomu 350 mg/m³ metodami pierwotnymi, najkorzystniejszą metodą jest zastosowanie SCR bez modyfikacji palników.

□ Kocioł, w którym dokonano już modyfikacji palników

Osiągnięto poziom poniżej 500 mg/Nm³, w przyjętym przykładzie 450 mg/m³. Po redukcji emisje muszą osiągnąć wartość 190 mg/m³.

Możliwe warianty postępowania:

1. Przy pomocy metody SCR - koszt sumaryczny: 69.250 tys. zł.
2. Instalacja palników niskoemisyjnych redukujących do poziomu 350 mg/m³, a następnie SNCR z redukcją do 190 mg/m³. Koszt sumaryczny: 27.250 + 41.000 = 68.250 tys. zł.

Wynik tego porównania przynosi następujące rezultaty:

- Koszty dla obydwu wariantów postępowania są, w granicach tolerancji obliczeń, jednakowe. Przy uwzględnieniu poważnego potencjału ryzyka wariantu b) oraz faktu, że wariant a) reprezentuje BAT, można z całą pewnością stwierdzić, że najkorzystniejszą metodą jest zastosowanie SCR bez mody-

Tab. 5. Założenia cenowe dotyczące metod pierwotnych i metody SNCR

| Opis | Jednostka | Dane | | | |
|---|--------------------|---------|---------|-----|-----|
| Obciążenie kotła | %WMT | 100% | | | |
| Ilość spalin | m ³ /h | 728 500 | | | |
| Wariant obliczeniowy | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Redukcja absolutna | mg/m ³ | 160 | 260 | 410 | 500 |
| Metoda SNCR | | | | | |
| Koszt inwestycyjny instalacji SNCR | tys. zł | ~4.500 | ~4.800 | | |
| Koszty eksploatacyjne dla 20 letniego okresu obliczeniowego | tys. zł | ~36.500 | ~56.250 | | |
| Sumaryczne koszty | tys. zł | ~41.000 | ~61.250 | | |
| Metody Pierwotne | | | | | |
| Redukcja do poziomu emisji | mg/Nm ³ | 350 | 450 | | |
| Koszty Inwestycyjne | tys. zł | ~22.000 | ~22.000 | | |
| Koszty eksploatacyjne dla 20-letniego okresu obliczeniowego | tys. zł | 2.250 | 1.250 | | |
| Dodatkowe koszty remontów i monitoringu kotła | tys. zł | 3.000 | | | |
| Sumaryczne koszty | tys. zł | 27.250 | 23.250 | | |

fikacji palników.

- W myśl powyższego stwierdzenia pytanie, czy dla danego kotła możliwe jest osiągnięcie poziomu 350 mg/m³ metodami pierwotnymi nie jest relewantne.

□ **Sytuacja wyjściowa jednakowa jak w przypadku kotła, w którym dokonano już modyfikacji**

1. Redukcja przy pomocy metody SCR - koszt sumaryczny: 69.250 tys. zł.
2. Redukcja przy pomocy metody SNCR - koszt sumaryczny: 61.250 tys. zł.

Porównanie to przedstawione zostało tylko dla teoretycznej analizy, ponieważ redukcja przy pomocy SNCR o 57,7% (z poziomu 450 do 190 mg/Nm³) jest niezgodna ze stanem techniki. Za maksymalny poziom redukcji NO_x przy pomocy technologii SNCR przyjmowany jest stopień 35-45%. Prowadzone są jednak próby osiągnięcia wyższych stopni redukcji.

■ Wnioski

W większości rozpatrywanych przypadków, po uwzględnieniu kosztów inwestycyjnych i eksploatacji, technologia SCR jest porównywalna z punktu widzenia całościowych nakładów z kombinacją metod pierwotnych i technologii SNCR. Dla kotłów, w których przy pomocy metod pierwotnych osiągnięto poziom emisji NO_x poniżej 500 mg/Nm³, bardziej korzystne jest zastosowanie wyłącznie technologii SCR niż dalsza modernizacja spalania. Odnosi się to zarówno do aspektów technologicznych, jak i ekonomicznych. W przypadku, kiedy emisje NO_x z kotła mogą zostać ograniczone metodami pierwotnymi do poziomu 350 mg/Nm³, technologia SNCR może okazać się tańszym sposobem osiągnięcia limitu emisji. Zastosowanie skrajnych redukcji przy metodach pierwotnych i SNCR związane są z ryzykami. W wielu przypadkach osiągnięcie wymaganego poziomu emisji w taki sposób nie jest możliwe lub też powoduje bardzo znaczące, przy podejmowaniu decyzji czę-

sto nie uwzględniane koszty uboczne wynikające z korozji wysokotemperaturowych, przestojów i remontów bloków elektrowni lub też z przekroczenia limitów. Sytuacja ta podlegać będzie dalszemu zaostrzeniu w wyniku oczekiwanej redukcji dopuszczalnych poziomów emisji NO_x.

■ Literatura

- [3] T. Wala - „Koncepcja obniżenia emisji NO_x metodą SCR na bazie przykładowych rozwiązań dla kotłów OP-650” - Referat na konferencję kotłową 2009 r.
- [4] A. Włodarczyk, B. Formanek, T. Wala i in. - „Ograniczenie korozji wysokotemperaturowej w kotłach opalanych węglem kamiennym w działaniach RAFAKO S.A.” - Referat na konferencję kotłową 2004 r.
- [5] Praca zbiorowa pod redakcją prof. W.Kordylewskiego - „Spalanie niskoemisyjne w kotłach energetycznych” - 2000 r.
- [6] D. Tomas, T. Wala - „Doświadczenia RAFAKO w zakresie nowych konstrukcji palników i palenisk niskoemisyjnych dla kotłów opalanych węglem” referat na konferencję kotłową 1999 r.
- [7] T. Wala - „Koncepcja obniżenia emisji NO_x metodą SCR na bazie przykładowych rozwiązań dla kotłów OP-650” referat na konferencję kotłową 2009 r.
- [8] K. Weigl, H. Schlicher, M. Parfuss, K. Krotla - „Advanced SCR-DeNO_x technology for NO_x reduction with long term experience on coal fired application” referat na Coal/Gen Europe, Warszawa 2008.
- [9] R. Budin, K. Krotla, H. Hartl - „Latest developments and the state of the art of catalytic DeNO_x plants after 15 years of experience” International conference on atmospheric pollution, Paris-La Defence 2001.
- [10] R. Budin, K. Krotla “Modern catalyst management : Regenerating, activating and optimizing SCR-DENOX catalysts upon activity loss and increase in SO₂ to SO₃ conversion”, VGB PowerTech, 2001.
- [11] G. Grucza, R. Wejowski - „Dostosowanie kotłów OP-650 do pracy niskoemisyjnej przy wykorzystaniu pierwotnych metod redukcji NO_x” - Referat na konferencję kotłową 2009 r. □