

Badania lanc rozpylających przeznaczonych do niekatalitycznej redukcji tlenków azotu (SNCR) w kotłach o małej mocy

Roman KRZYWDA*, Bogumiła WRZESIŃSKA, Tomasz WĄSOWSKI – Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2016, 70, 10, 605–610

Wstęp

Począwszy od 1990 r. wymagania dotyczące emisji z instalacji energetycznych ulegają systematycznemu zaostrzeniu. W przypadku spalania węgla kamiennego ograniczeniu podlega m.in. emisja tlenków azotu (łącznie NO i NO₂ w przeliczeniu na NO₂).

Obecne standardy emisyjne określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z 2014 r. [1]. Dla mocy cieplnej źródła poniżej 50 MW limit emisji tlenków azotu po 2015 r. wynosi 400 mg/m³, dla zakresu 50–100 MW – 300 mg/m³, natomiast dla mocy cieplnej powyżej 100 MW – 200 mg/m³. Moc cieplna dostarczona w paliwie liczona jest łącznie dla wszystkich kotłów, z których spaliny wprowadzane są do wspólnego emitera – komina.

Unia Europejska planuje dalsze ograniczenie emisji tlenków azotu – wstępne założenia nowych norm ukazały się w propozycji Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants w 2013 r. [2]. Dla istniejących instalacji, o łącznej mocy cieplnej w zakresie 50–100 MW, proponowany jest limit 270 mg/m³, natomiast w zakresie 100–300 MW limit 180 mg/m³. Dla nowych instalacji proponowany limit, to 100 mg/m³ w zakresie łącznej mocy cieplnej od 50 do 300 MW.

Z powyższego widać, że szczególnemu obostrzeniu podlegać będą normy dla niedużych instalacji wyposażonych w kilka kotłów, np. popularne kotły WR 25 (o mocy cieplnej dostarczonej w paliwie rzędu 29 MW) lub w równie powszechne kotły WR 10. Szacuje się, że w polskim ciepłownictwie pracuje kilkaset tego typu kotłów.

Ponieważ techniczne możliwości redukcji tlenków azotu metodami pierwotnymi (głównie stosowanie odpowiedniej technologii spalania) kończą się na granicznej emisji ok. 300 mg/m³, niezbędnym staje się stosowanie metod wtórnych.

Do najczęściej używanych wtórnych metod ograniczenia emisji tlenków azotu zaliczyć należy stosowanie rodników amonowych NH₃, które w wyniku reakcji z tlenkami azotu wytwarzają azot N₂, wodę i ewentualnie CO₂. Źródłem rodników jest wprowadzany w strumień spalin amoniak lub mocznik, natomiast reakcja może przebiegać bądź w obecności katalizatora lub bez niego. W tym drugim przypadku mamy do czynienia z technologią selektywnej niekatalitycznej redukcji tlenków azotu SNCR (*selective non-catalytic reduction*). Jest ona szczególnie polecana dla niewielkich instalacji energetycznych z uwagi na stosunkowo niskie koszty inwestycyjne i prostotę rozwiązania [3].

W przypadku stosowania SNCR, na skuteczność redukcji zawartości tlenków azotu w spalinach wpływa szereg parametrów. Odpowiedni czynnik redukcyjny musi kontaktować się ze spalinami o określonej temperaturze (mocznik: 900 ÷ 1150°C, amoniak: 870 ÷ 1100°C). Bardzo ważną rolę odgrywa też właściwy sposób dystrybucji reagenta do spalin. Stąd też jednym z istotniejszych elementów instalacji SNCR są lance rozpylające, służące do wprowadzania najczęściej stosowanego wodnego roztworu mocznika do strumienia spalin.

Dobór lanc rozpylających dla systemu SNCR dedykowanego dla kotłów o małej mocy

Urządzenia rozpylające użyte w systemie SNCR muszą spełniać m.in. następujące wymagania:

- posiadać duży zakres regulacji wydajności
- generować krople o odpowiednich średnicach
- nadawać kropłom odpowiednią energię w celu osiągnięcia wymaganego zasięgu
- zapewniać odporność na temperaturę 1200°C i na zarastanie
- zapewniać łatwość montażu w ścianie kotła (bez rozginania rurek wodnych).

Lance rozpylające wykonuje się jako urządzenia jednofazowe – hydrauliczne i dwuczynnikiowe – pneumatyczne. Te pierwsze charakteryzują się małym zakresem regulacji, generują krople o dużych rozmiarach i są wrażliwe na blokowanie. Lance pneumatyczne mają duży zakres regulacji, umożliwiają otrzymanie strugi kropeł o dowolnym kształcie i kącie rozpylenia oraz pozwalają na wytworzenie kropeł o małych rozmiarach [4]. Z tych powodów przyjęto, że jako urządzenia rozpylające w instalacjach SNCR dla kotłów o małej mocy będą stosowane lance pneumatyczne.

Z uwagi na obszar, w którym następuje mieszanie faz rozróżniamy konstrukcje z wewnętrznym i zewnętrznym mieszaniem faz. System mieszania wewnętrznego, pomimo pewnego ograniczenia regulacyjnego, zapewnia równomierną gęstość zraszania, a ponadto umożliwia wyprowadzenie strugi kropeł z wewnętrznej komory mieszania jednym lub wieloma otworami – stąd też tego typu lance zostały wybrane do badań.

Dodatkowym kryterium wynikającym z konstrukcji ścian osłonowych w kotłach małej mocy było ograniczenie średnicy zewnętrznej lancy – nie powinna ona przekraczać 20 mm.

Metodyka pomiarowa

Dla przeprowadzenia pomiarów parametrów pracy lanc rozpylających zostało wykonane specjalne stanowisko badawcze składające się z komory wtryskowej o długości 6 m, sekcji zasilająco-pomiarowej do dystrybucji obu faz oraz z urządzeń pomiarowych.

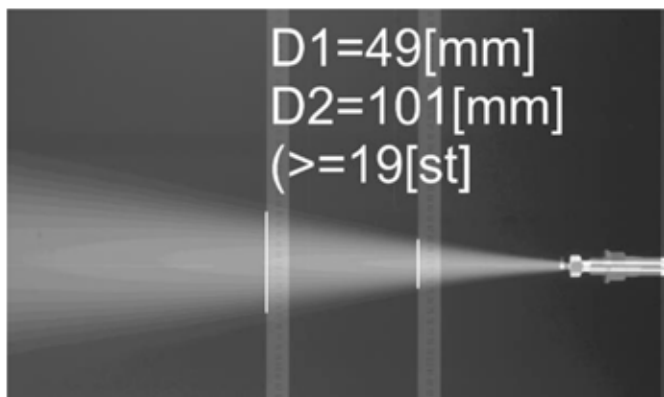
Na stanowisku pomiarowym zostały przeprowadzone pomiary następujących parametrów wybranych konstrukcji lanc: kąta rozpylenia strugi; odchylenia strugi od osi; średnic kropeł – d_{32} (średnica objętościowo-powierzchniowa Sautera) i prędkości wylotowej powietrza.

Parametrami zmiennymi były: konstrukcja lancy (ilość i wielkość otworów zasilających fazą zewnętrzną komorę mieszania, długość komory mieszania, średnica otworu wylotowego); natężenie przepływu wody; nadciśnienie powietrza i konfiguracja zasilania: LA (*Liquid to Air*) – strumień centralny; powietrze, strumień zewnętrzny; woda lub AL (*Air to Liquid*).

Pomiar kąta rozpylenia i odchylenia strugi przeprowadzono metodą fotograficzną, stosując odpowiednio długi czas naświetlania w celu wytlumienia fluktuacji strugi, zmianę posteryzacji zdjęć, aby wyostrzyć granice gradientów barw na zdjęciu i nałożenie na tło z naniesionymi miarkami. Na Rysunku 1 przedstawiono przykładowe zdjęcie strugi poddane obróbce.

*Autor do korespondencji:

Dr inż. Roman KRZYWDA, e-mail: r.krzywda@ichip.pw.edu.pl

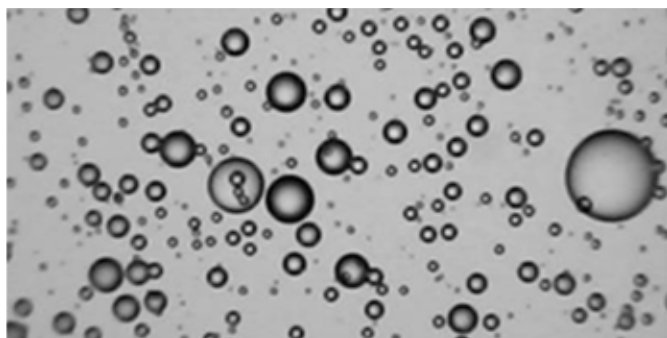


Rys. 1. Pomiar kąta rozpylenia strugi

Do pomiaru średnic kropeł zastosowano dwie metody:

- metodą cieczy immersyjnej – MCI: wyłapywanie kropeł na szkiełko mikroskopowe pokryte cieczą immersyjną (olejem silikonowym) wprowadzane na specjalnym wysięgniku w rdzeń lub dolną część strugi, wykonanie szeregu zdjęć mikroskopowych w znanej skali, a następnie poddanie fotografii analizie wykorzystując program Image-ProPlus lub ImageJ
- pomiar metodą dyfrakcji laserowej przy pomocy urządzenia Spraytec firmy Malvern, które umożliwia automatyczne pomiary *in-situ* aerozoli o dużym stężeniu.

Na Rysunku 2 przedstawiono przykładowe zdjęcie mikroskopowe uzyskane w metodzie MCI.

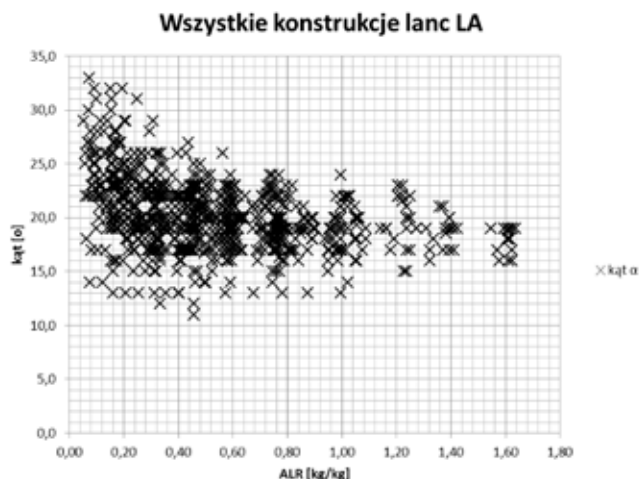


Rys. 2. Zdjęcie mikroskopowe kropeł w metodzie MCI

Prędkość wylotową powietrza z lancy (bez przepływu wody) mierzono przy pomocy anemometru ciśnieniowego VOLT-CRAFT VPT-100.

Wybrane wyniki pomiarów

Podczas wstępnych pomiarów ustalono, że konfiguracja zasilania LA w przeciwieństwie do konfiguracji AL nie powoduje pulsacji strugi, stąd też taki system zasilania został uznany jako korzystniejszy.

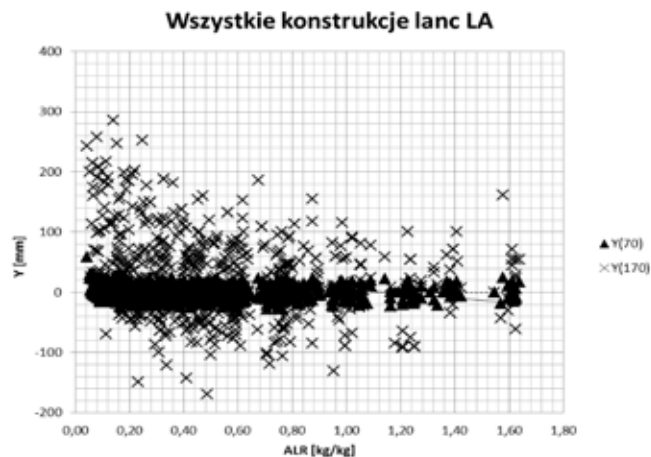


Rys. 3. Zależność kąta rozpylenia strugi od ALR

Na Rysunku 3 przedstawiono zależność kąta rozpylenia strugi dla lancy jednoczerwonej w zależności od stosunku przepływów masowych dwóch faz – ALR (*Air to Liquid Ratio*) kg/kg.

Jak widać, uzyskane kąty rozpylenia dla lancy jednoczerwonej zawierają się w granicach $11 \div 33^\circ$. Wraz ze wzrostem wartości ALR różnice kątów rozpylenia dla różnych konstrukcji lanc są coraz mniejsze. Lance o konstrukcji z mieszaniem wewnętrznym umożliwiają ponadto zastosowanie wieloczerwonych dysz wylotowych zwiększających kąt rozpylenia – np. 3 symetrycznie umieszczone otwory wylotowe.

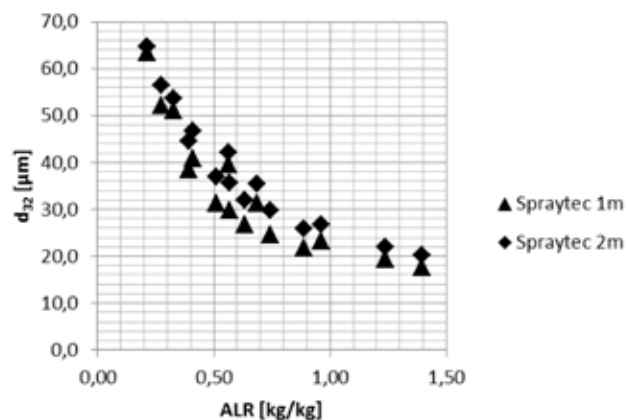
Na Rysunku 4 przedstawiono zależność odchylenia strugi od osi poziomej w odległości 0,7 m i 1,7 m od wylotu z dyszy – wartości dodatnie Y odzwierciedlają odchylenie strugi w dół.



Rys. 4. Odchylenie strugi w odległości od dyszy 0,7 m i 1,7 m

W odległości 0,7 m praktycznie nie występuje odchylenie strugi, natomiast maksymalne odchylenie strugi w odległości 1,7 m wynosi jedynie 30 cm, ponadto wraz ze wzrostem wartości ALR odchylenie to maleje.

Na Rysunku 5 przedstawiono zależność średniej średnicy kropeł od miejsca pomiaru dla jednej z przebadanych konstrukcji lanc. Pomiar wykonano za pomocą urządzenia Spraytec w odległości 1 m i 2 m od wylotu dyszy.



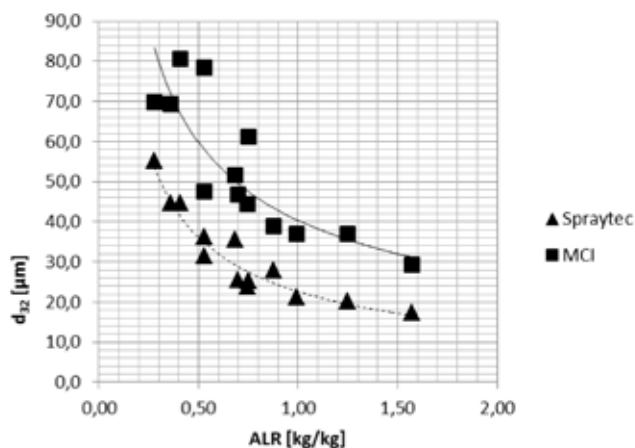
Rys. 5. Zależność średniej średnicy kropeł d_{32} od miejsca pomiaru

Jak widać z przedstawionego wykresu, ze wzrostem odległości od dyszy średnia średnica kropeł wzrasta, przy czym różnice są niewielkie (kilka mikrometrów).

Na Rysunku 6 przedstawiono porównanie zmierzonych średnic średnic kropeł metodą cieczy immersyjnej MCI i za pomocą urządzenia Spraytec dla przykładowej lancy.

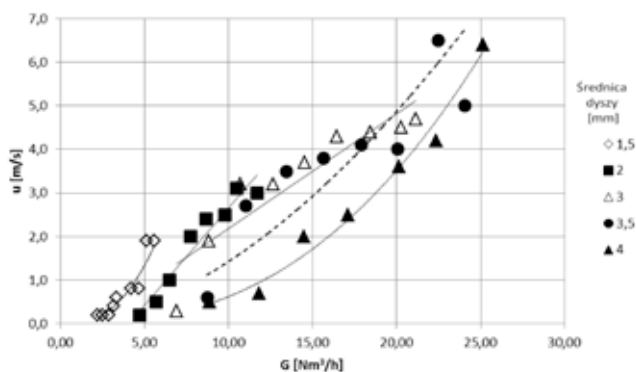
Średnice zmierzone za pomocą urządzenia Spraytec są mniejsze niż zmierzone metodą wyłapywania przez ciecz immersyjną (MCI). Różnice mogą wynikać z faktu, że pomiar metodą cieczy immersyjnej był dokonywany punktowo w rdzeniu strugi, natomiast urządzenie

Spraytec mierzyło średnice kropeł w całym przekroju poziomym strugi. Niewątpliwie metoda MCI jest mniej dokładna (mierzony jest ślad kropeł) i bardziej pracochłonna, natomiast jej zaletą jest wykorzystanie prostych narzędzi i możliwość pomiaru w dowolnym miejscu bez instalacji kosztownej aparatury pomiarowej.



Rys. 6. Porównanie metod pomiarowych średniej średnicy kropeł d_{32}

Na Rysunku 7 przedstawiono zależność prędkości strugi powietrza w odległości 2,5 m od wylotu z lancy w funkcji natężenia przepływu dla kilku średnic dyszy wylotowej.



Rys. 7. Prędkość liniowa powietrza u [m/s] w funkcji natężenia przepływu G [Nm³/h]

Uzyskane zależności prędkości liniowych gazu od natężenia przepływu i średnicy dyszy wylotowej są oczywiste, natomiast zostało udokumentowane występowanie stosunkowo znacznych prędkości liniowych gazu pomimo odległości 2,5 m od wylotu dyszy.

Wnioski

Ograniczenie emisji tlenków azotu metodą SNCR jest obecnie najbardziej korzystnym rozwiązaniem dla instalacji energetycznych małej mocy ze względu na prostotę rozwiązania i koszty inwestycyjne. Wymaga jednak indywidualnego podejścia do projektowania instalacji z uwagi na różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych kotłów, w tym także doboru urządzeń rozpylających o odpowiedniej charakterystyce.

Lance rozpylające dwuczynnikowe (pneumatyczne) są najbardziej odpowiednimi urządzeniami do wprowadzania czynnika redukcyjnego do oczyszczanych spalin.

Odpowiednie stanowisko badawcze oraz metodyka pomiarowa pozwala na określenie pełnej charakterystyki badanej lancy rozpylającej. Podstawowym parametrem wpływającym na średnicę Sautera d_{32} wytwarzanych kropeł jest ALR, czyli stosunek przepływu masy fazy gazowej do przepływu masy fazy ciekłej. Lance dwuczynnikowe gwarantują uzyskanie przez krople energii kinetycznej wystarczającej do penetracji w głąb strumienia spalin w stosunkowo niewielkich komorach spalania kotłów o małej mocy.

Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, Dz. U., 2014, poz. 1546.
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants. Draft 1, 2013.
3. Wrzesińska B. i inni: *Technologia selektywnej niekatalitycznej redukcji tlenków azotu pod kątem zastosowania jej w kotłach dla energetyki przemysłowej i ciepłownictwa*. Przem. Chem., 2015, **94**, 4, 608–613.
4. Orzechowski Z., Prywer J.: *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*. WNT Warszawa 2008.

Projekt współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego zgodnie z umową POIG.01.03.01-14-035/12



Dr inż. Roman KRZYWDA jest absolwentem Instytutu Inżynierii Chemicznej Politechniki Warszawskiej, który ukończył z wyróżnieniem (1982). W 1989 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii chemicznej. Obecnie jest adiunktem na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. Jest współautorem 2. patentów, autorem i współautorem 10. publikacji, 9. wystąpień konferencyjnych. Zainteresowania naukowe: symulacja komputerowa procesów przemysłu chemicznego i pokrewnych, oczyszczanie gazów, piroliza odpadów gumowych.
e-mail: r.krzywda@ichip.pw.edu.pl, tel.: 22 234 62 74

Dr inż. Bogumiła WRZESIŃSKA jest absolwentką Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, który ukończyła w 1991 r. W 1997 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii chemicznej. Obecnie jest starszym wykładowcą w Katedrze Inżynierii Procesów Zintegrowanych WChiP PW. Jest współautorką 1. patentu, 5. technologii przemysłowych i 7. publikacji. Zainteresowania naukowe: oczyszczanie gazów spalinowych z zanieczyszczeń stałych i gazowych, procesy pirolizy odpadów stałych oraz oczyszczanie i waloryzacja produktów pirolizy, biopaliwa.
e-mail: b.wrzesinska@ichip.pw.edu.pl, tel.: 22 234 63 23

Dr inż. Tomasz WAŚOWSKI jest absolwentem Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej (kierunek inżynieria chemiczna), który ukończył w 1971 r. W 1980 r. uzyskał z wyróżnieniem stopień doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii chemicznej. W latach 1983/85 odbył staż naukowy na Politechnice w Monachium. Obecnie jest starszym wykładowcą w Katedrze Inżynierii Procesów Zintegrowanych WChiP PW. Jest autorem lub współautorem 6. patentów, 6. licencji, 10. wdrożeń i szeregu publikacji. Zainteresowania naukowe: aparatura procesowa, oczyszczanie gazów, piroliza odpadów stałych, biopaliwa.
e-mail: t.wasowski@ichip.pw.edu.pl, tel.: 22 234 64 92