dr inż. Ewelina RÓŻYCKA-WROŃSKA

Politechnika Warszawska

ORCID: 0000-0002-8590-5014

prof. dr hab. inż. Krzysztof WOJDYGA

Politechnika Warszawska

ORCID: 0000-0002-1387-0609

WSKAŹNIKI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA DLA KOTŁÓW TYPU WR

Streszczenie

Przedstawiono istotne zagadnienia dotyczące wodnych kotłów rusztowych typu WR. Przeanalizowano obecnie obowiązujące akty prawne w zakresie ochrony powietrza, a szczególnie wskaźniki/standardy emisji zanieczyszczeń z tego typu źródeł energii. Omówiono również problem warunków niestabilnej pracy kotła w aspekcie określania wskaźników emisji, w tym głównie zmiennego obciążenia całej ciepłowni i poszczególnych kotłów w ciągu roku.

Słowa kluczowe: emisja, kotły, ciepłownia, zanieczyszczenie powietrza, spalanie, wskaźniki

AIR POLLUTANT EMISSION INDICATORS FOR WR TYPE BOILERS

Summary

Significant issues concerning the WR type water grate boilers are presented. The current legal acts in the field of air protection have been analyzed, in particular the indicators/standards of pollutant emissions from this type of energy sources. The problem of unstable boiler operation conditions was also discussed in terms of determining emission factors, including mainly the variable load of the entire heating plant and individual boilers during the year.

Key words: emission, boiler, heating plant, air pollution, combustion, indicators

1. Wprowadzenie

Obecnie prawie 80% potrzeb elektroenergetycznych kraju pokrywane jest nadal przez paliwa stałe, w tym głównie węgiel kamienny. Z analizy struktury pokrycia potrzeb energetycznych kraju wynika, że problem ten w Polsce jest szczególnie istotny. Zdecydowana większość funkcjonujących ciepłowni spala głównie węgiel kamienny. Wynika to przede wszystkim z uwagi na jego dostępność i cenę oraz fakt, że zostały one wybudowane w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku, zaprojektowane na węgiel

kamienny i są eksploatowane od 40 ÷ 50 lat [1]. Konwencjonalne układy do produkcji nośnika ciepła wykorzystują opalane paliwami stałymi instalacje z kotłem, w którym przy spalaniu węgla towarzyszy emisja pyłów i zanieczyszczeń gazowych. Jak wynika z równań stechiometrycznych, w przypadku braku urządzeń oczyszczających, spalanie 1 mln ton węgla kamiennego o zawartości siarki 0,8%, zawartości węgla pierwiastkowego 92%, zawartości azotu 1%, zawartości popiołu 6%, powoduje emisję 16 000 Mg SO₂, 3 373 333 Mg CO₂, 12 000 Mg pyłu, 21 430 Mg NO_x. Oddziaływanie na środowisko i zdrowie ludzi jest w chwili obecnej przedmiotem wielu prac naukowo – badawczych i publikacji [2÷6].

Wielkość emisji zanieczyszczeń zależy głównie od ilości spalanego węgla oraz od jego rodzaju i jakości. Jakość paliwa ma bezpośredni wpływ na pracę kotła, jego sprawność, proces spalania, a więc również na wielkość emisji. Dodatkowo, jednostkową zmianę wskaźnika emisji powoduje zmienne obciążenie kotłowni zależne od warunków zewnętrznych, a w przekroju rocznym, głównie temperatury zewnętrznej. Moc ciepłowni zmienia się w ciągu roku ze względu na podział na okres letni i okres grzewczy, które ściśle zależą od warunków pogodowych. Latem, poza sezonem grzewczym, ciepłownia pracuje głównie w oparciu o jeden kocioł pracujący na cele przygotowania ciepłej wody użytkowej, wykorzystując ok. 20–30% swojej mocy nominalnej (wg DTR¹). W ciągu sezonu grzewczego, w zależności od temperatury zewnętrznej, ciepłownia pokrywa zapotrzebowanie na ciepło grzewcze oraz ciepłą wodę użytkową osiągając moc nominalną przy temperaturze poniżej 253 K.

2. Charakterystyka kotłów WR

Kotły wodne rusztowe typu WR opalane miałem węgla kamiennego (sortymentu MI 20-0 mm lub MII 10-0 mm) zamontowane są w ciepłowniach i elektrociepłowniach oraz w zakładach przemysłowych jako urządzenia do wytwarzania ciepła. Ideowy schemat budowy typowego kotła typu WR przedstawiono na rys. 1.

Rys. 1. Budowa typowego kotła rusztowego typu WR o mocy nominalnej od 5–10 MW, opalanego miałem węglowym produkcji SEFAKO S.A. [7]

¹ DTR – Dokumentacja Techniczno-Ruchowa kotła

Kocioł jest zabudowany w układzie dwuciągowym, gdzie I ciąg stanowi wyekranowana ścianami gazoszczelnymi komora paleniskowa. Obmurze kotła stanowi sklepienie przednie oraz wyłożenie ścian bocznych w obrębie zapłonu węglowodorów. II ciąg stanowi wzdłużnie opłętowany pęczek konwekcyjny. Ściany drugiego ciągu wykonane są również jako ściany gazoszczelne. Kocioł jest wyposażony w instalacje sterujące procesem spalania tj. wtórnego powietrza nad rusztem i recyrkulacji spalin pod ruszt. Ruszt mechaniczny jest wyposażony w kaskadowy układ podawania paliwa, dzięki czemu może być przystosowany do równoległego współspalania odpadów.

Komora paleniskowa, palenisko, lub palnik, to element każdego kotła, w którym następuje przemiana energii chemicznej zawartej w paliwie na ciepło. Od jego sprawności zależy nie tylko sprawność energetyczna kotła, ale również poziom emisji. Najlepiej byłoby, by uzyskać spalanie jak najbliższe stechiometrycznemu, gwarantujące pełne wykorzystanie energii chemicznej paliwa, a jednocześnie gwarantujące również najmniejsze wskaźniki emisji zanieczyszczeń. Nie uda się tego uzyskać w palenisku o bardzo prostej konstrukcji, bez kontroli składu spalin i precyzyjnego dawkowania powietrza. Nie mniej istotne jest ukształtowanie płomienia, właściwy rozkład temperatur w komorze paleniskowej czy cyrkulacja gazów w strefie spalania. W przypadku kotłów na paliwo stałe istotne są problemy związane ze stałością jego parametrów fizycznych i chemicznych. Zasadniczo należałoby stosować takie paliwo na jakie kocioł został zaprojektowany, ale w praktyce jest to bardzo trudne do wykonania. Bardzo dobre rezultaty daje zastosowanie palenisk multistrefowych, w których można precyzyjnie sterować ilością powietrza pierwotnego. Ilość stref podmuchowych w kotłach rusztowych waha się od kilku do kilkunastu. Aby w pełni wykorzystać zalety paleniska tego typu, wskazane jest zastosowanie wózków rewersyjnych, które zapewniają równomierny rozkład paliwa na ruszcie, oraz uporządkowanie gospodarki powietrzem wtórnym z uwzględnieniem układu recyrkulacji spalin. Jeśli zastosujemy odpowiedni system monitoringu parametrów ruchowych regulacji, to uzyskanie średniorocznej sprawności kotła typu WR jest możliwe na poziomie 82 – 83%.

Pośród kilku rodzajów palenisk z rusztem mechanicznym w Polsce stosuje się prawie wyłącznie paleniska z rusztem taśmowym i grawitacyjnym zasypem paliwa. Konstrukcja paleniska rusztowego jest znana od wielu lat. Ponad 90% kotłów zainstalowanych w krajowych ciepłowniach i zakładach przemysłowych oparta jest o klasyczne paleniska rusztowe. Przez wiele lat dokonywano wielu zmian i usprawnień pozwalających spalać węgiel z dużą efektywnością.

Zasada pracy paleniska rusztowego jest prosta. Paliwo (miał węglowy) podawane jest z miejsca jego składowania przez taśmowy układ nawęglania. Ilość węgla podawanego z zasobnika do procesu spalania jest regulowana prędkością posuwu rusztu i grubością warstwy węgla na ruszcie. Pod warstwownicą, która ustala początkową wysokość warstwy, wędruje z prędkością $80 \div 500$ mm/min do komory paleniskowej. Na końcu rusztu jest umieszczona belka spiętrzająca, poprawiająca stopień wypalenia paliwa.

Spalanie węgla następuje wewnątrz kotła, w komorze spalania na przesuwającym się ruszcie mechanicznym.

Niejednorodne parametry paliwa oraz próby spalania gorszych gatunków węgla powodują duże problemy z eksploatacją kotłów oraz duży wzrost emisji substancji emitowanych w ilościach śladowych przy spalaniu prawie stechiometrycznym (LZO, NH_3 , HF, HCl i CO). Aktualnie stosuje się wiele podanych powyżej rozwiązań technicznych usprawniających pracę kotła z paleniskiem rusztowym. Następujące kolejno na ruszcie procesy suszenia, odgazowania, zgazowania koksu i wychładzania żużla wymagają innej ilości tlenu. Aby polepszyć pracę paleniska rusztowego stosuje się strefowe podawanie powietrza. Pod rusztem znajduje się skrzynia podrusztowa ze strefami podmuchowymi i kanał doprowadzający konieczne do spalania powietrze atmosferyczne do wnętrza stref

podmuchowych, zwane powietrzem pierwotnym. Nad rusztem znajduje się komora spalania z kanałem powietrza wtórnego. Powietrze wtórne stanowi ok. 10% całości doprowadzanego powietrza i z dużą prędkością wdmuchiwane jest nad rusztem.

Powietrze pierwotne musi pokonać opory przepływu rusztu i leżące na nim warstwy paliwa. Przy silnym zróżnicowaniu granulacji węgla drobne frakcje mają tendencję do zbijania się, co powoduje występowanie w takich obszarach silnie redukcyjnej atmosfery, prowadzącej do spiekania się paliwa.

W kotłach WR-25 zabudowuje się najczęściej siedem szczelnych stref. Każda strefa wyposażona jest w klapę regulacyjną ilości podawanego powietrza. Możliwość regulacji powietrza pozwala na utrzymanie niskiego współczynnika λ i pracę kotła z dużą sprawnością. Oprócz kotłów z grawitacyjnym zasypem paliwa na ruszt, spotyka się też kotły z narzutem mechanicznym i rzadziej pneumatycznym. Narzut mechaniczny wymaga, aby ruszt poruszał się od tyłu paleniska w kierunku narzutnika.

Krajowe kotły rusztowe to w większości konstrukcje stosunkowo stare, a uzyskiwane przez nie sprawności oraz poziomy emisji substancji szkodliwych na ogół nie odpowiadają współczesnym wymaganiom. [8]

3. Określenie wskaźników emisji zanieczyszczeń powietrza

W krajowej praktyce brak jest obiektywnych merytorycznie zasad bilansowania ładunku emisji i jej wskaźników ze źródeł ciepłowniczych małej mocy ($5 \div 50$ MWt), opalanych węglem kamiennym, w nieustalonych i niestabilnych warunkach spalania.

Duża zmienność obciążeń kotłów ciepłowniczych zależna od temperatury zewnętrznej powoduje istotną zmienność wskaźników emisji, a częste uruchamianie (rozruch) i wygaszanie kotłów skutkuje bardzo istotnymi zmianami wskaźników emisji w tzw. warunkach spalania odbiegających od normalnych w stosunku do ogólnie stosowanych.

Metodę analizy i oceny określania wskaźników emisji gazowych zanieczyszczeń powietrza (SO_2 , NO_x i CO) w analizowanych źródłach ciepłowniczych, można opisać formułami matematycznymi ujmującymi warunki odbiegające od normalnych (rozruch, wygaszanie i szybkie oraz głębokie zmiany obciążeń).

Model liczenia/określania wskaźników emisji gazowych zanieczyszczeń powietrza (SO_2 , NO_x i CO), umożliwi określenie tych wielkości w zależności od fazy procesu w warunkach niestabilnych i mogący być wdrożony do praktyki strategii ochrony powietrza.

W procesach spalania paliw wielkości wskaźników emisji określa się z bezpośrednich pomiarów wykonanych w kanałach spalinowych za kotłami, a przed urządzeniami oczyszczającymi. W przypadku braku pomiarów do obliczeń emisji używane są wskaźniki podawane najczęściej: w ilościach masy zanieczyszczenia na jednostkę masy spalanego paliwa, w ilościach masy zanieczyszczenia na jednostkę termiczną paliwa (TJ) oraz stężenia zanieczyszczeń w ilościach masy na objętość spalin (mg/Nm^3) [9]. Metoda wskaźnikowa jest przydatna najczęściej we wstępnej fazie projektowania kotłowni, przy opracowaniu założeń projektowych oraz w sprawozdawczości.

W przypadku źródeł istniejących emisję substancji zanieczyszczających ustala się najczęściej na podstawie badań i uzyskanych wyników pomiarów, ale również można ją ustalać na podstawie wskaźników.

W procesach spalania paliw w kotłach ciepłowniczych wielkość emisji zanieczyszczeń w warunkach normalnych określana jest na podstawie zużycia paliwa oraz stosowanych formuł i wskaźników emisji.

Emisje te dla celów zagadnień jakości powietrza powinny być określone dla okresów zawartych w rozporządzeniu Ministra Środowiska dotyczącym metodyki rozprzestrzeniania

się zanieczyszczeń i określania oddziaływania danego obiektu na stan jakości powietrza. W przypadku ciepłowni okresy te wynikają z analizy wykresu uporządkowanego produkcji ciepła. Zużycie paliwa określane jest na podstawie rzeczywistego jego zużycia przez kotłownię, obliczonego przez obsługę i zapisanego w „książce ruchu kotła”[10]. Bądź w oparciu obliczenia teoretyczne na podstawie zależności:

$$B = \frac{Q}{\eta \cdot Q_w} \quad (3.1.)$$

gdzie:

B – ilość zużytego paliwa,

Q – moc cieplna kotła / kotłowni,

Q_w – wartość opałowa paliwa w stanie roboczym,

η – sprawność kotła nominalna.

Liczbowe wartości wskaźników emisji z istniejących instalacji można wyznaczać doświadczalnie, na podstawie licznych pomiarów emisji, wykonywanych w różnych warunkach technologicznych. Pomiary emisji polegają na równoczesnym określaniu wielkości objętościowego strumienia emitowanych gazów i stężenia zanieczyszczenia w tych gazach. Pomiary są wykonywane przez akredytowane laboratoria, z użyciem urzędowo obowiązujących metod. Ustala się wartość maksymalną oraz średnią. Wskaźnik emisji zanieczyszczeń z określonej instalacji jest ilorazem emisji przez wielkość produkcji [10]. Sposób w jaki można określić wielkość wskaźnika emisji zanieczyszczeń dla paliw stałych na rusztach mechanicznych przedstawiono w zależności ogólnej postaci:

$$e_{SO_2} = \frac{E_{SO_2}}{s \cdot B} \left[\frac{kg}{Mg\%} \right] \quad (3.2)$$

$$e_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{c \cdot B} \left[\frac{kg}{Mg\%} \right] \quad (3.3)$$

$$e_{NO_2} = \frac{E_{NO_2}}{B} \left[\frac{kg}{Mg} \right] \quad (3.4)$$

$$e_{CO} = \frac{E_{CO}}{B} \left[\frac{kg}{Mg} \right] \quad (3.5)$$

gdzie:

E_{SO_2} , E_{NO_2} , E_{CO} , E_{CO_2} - emisja substancji wg pomiarów, [kg/h];

s - zawartość siarki całkowitej, [%];

c - zawartość węgla pierwiastkowego, [%];

B - zużycie paliwa [Mg/h]: w przypadku paliw stałych oraz ciekłych określane wzorem:

$$B = \frac{Q \cdot p_i}{\eta \cdot Q_w} \cdot 3,6 \quad [Mg/h] \quad (3.6)$$

gdzie:

Q – wydajność kotła, [MW];

p_i – wskaźnik obciążenia kotłowni, [%],

Q_w – wartość opałowa paliwa, [MJ/kg];

η – sprawność kotła, [%].

1. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania zostały przeprowadzone w czterech ciepłowniach zasilających systemy ciepłownicze. Opisywane obiekty to: PEC „A”, MPEC „B”, PEC „C”, PEC „D”.

Sondę pomiarową we wszystkich przypadkach umieszczono w kanale spalinowym za kotłem WR, w przekroju pomiarowym spełniającym odpowiednie wymagania przepływowe dla takich pomiarów. Sondę pomiarową umieszczono przed urządzeniami oczyszczającymi.

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych stwierdzono znaczne zmiany wielkości stężeń emisji zanieczyszczeń podczas niestabilnej pracy analizowanych kotłów.

Podczas pierwszej fazy rozruchu kotła WR-25 w PEC „A” wystąpiły bardzo duże stężenia tlenu węgla i metanu w spalinach. Tak duże stężenia tych związków związane są z brakiem optymalizacji procesu spalania. W momencie wzrostu wydajności kotła poziom stężenia CO i CH₄ w spalinach obniża się, z uwagi na stabilizację pracy paleniska. Podczas rozruchu kotła WR-25 w MPEC w „C” również zaobserwowano podobne zależności w pierwszej fazie rozruchu. Z uwagi na dużą ilość podanego paliwa, odnotowano znaczny wzrost stężeń tlenu węgla i metanu oraz gwałtowny wzrost emisji ditlenku siarki. Wraz ze wzrostem wydajności kotła w obu przypadkach wzrasta poziom emisji ditlenku siarki oraz tlenków azotu. Wielkość emisji SO₂ zależy ściśle od zawartości siarki w paliwie i ilości podawanego paliwa na ruszt. Im wyższa moc kotła, tym więcej paliwa zostaje kierowane na ruszt mechaniczny. Wielkość emisji NO_x wzrasta wraz ze wzrostem temperatury w komorze spalania, czyli wzrostem mocy kotła. Żadne wielkości emisji nie zostały przekroczone, wg [11]. Przeprowadzona analiza określania wskaźników emisji SO₂ i NO_x oraz CO+CH₄, wykazuje, że otrzymane wyniki pomiarów można opisać następującymi zależnościami matematycznymi: (dopasowano wielomian szóstego stopnia metodą najmniejszych kwadratów uzyskując wysokie współczynniki korelacji R²)

- Dla rozruchu kotła WR-25 w czasie 3h 15 min:
 - SO₂: $y = -1E-14x^6 + 4E-11x^5 - 6E-08x^4 + 4E-05x^3 - 0,0159x^2 + 3,03x - 40,682$
R² = 0,9354
 - NO_x: $y = -3E-14x^6 + 1E-10x^5 - 1E-07x^4 + 8E-05x^3 - 0,0258x^2 + 3,4161x + 5,4571$
R² = 0,8663
 - CO+CH₄: $y = -4E-14x^6 + 9E-11x^5 - 7E-08x^4 + 2E-05x^3 - 0,0034x^2 + 1,9785x + 127,35$
R² = 0,823
- Dla rozruchu kotła WR-10 w czasie 1h 26 min:
 - SO₂: $y = -3E-15x^6 + 2E-11x^5 - 6E-08x^4 + 8E-05x^3 - 0,0457x^2 + 11,026x - 24,646$
R² = 0,58
 - NO_x: $y = -8E-16x^6 + 5E-12x^5 - 1E-08x^4 + 2E-05x^3 - 0,0096x^2 + 2,3012x - 17,823$
R² = 0,7968
 - CO+CH₄: $y = 8E-15x^6 - 5E-11x^5 + 1E-07x^4 - 0,0002x^3 + 0,0974x^2 - 24,768x + 2179,7$
R² = 0,8186

Podczas wygaszania bądź zmiany obciążenia cieplnego można zaobserwować podobne zjawiska. Wraz ze zmniejszeniem wydajności kotła wzrasta wielkość emisji tlenu węgla oraz metanu. Emisja pozostałych związków takich jak SO₂ czy NO_x stopniowo zanika. W trakcie wygaszania kotła WR-10M w PEC „C” wzrost emisji CO osiągnął bardzo wysoki poziom. Również wzrost emisji metanu potwierdza zakładaną tezę pracy. Podobne zjawiska obserwujemy na jednostce WR-25 w MPEC „B”. Jednak wygaszanie jednostki prowadzone było w sposób bardziej stabilny, niegwałtowny, dzięki czemu wzrost emisji CH₄ i CO nie osiągnął wysokich wartości. Warto również podkreślić, co dobrze widać na przykładzie PEC „D”, że mniejsze jednostki kotłowe mają mniejszą bezwładność i wprowadzenie jakichkolwiek zmian skutkuje natychmiastową zmianą wielkości emitowanych związków do

atmosfery. Otrzymane wyniki pomiarów można opisać następującymi zależnościami matematycznymi, dopasowano wielomian szóstego stopnia metodą najmniejszych kwadratów, uzyskując wysokie współczynniki korelacji R^2 .

Dla tych przypadków obliczenia wskaźników i emisji przyjmują następującą postać:

- Dla wygaszania kotła WR-25 w czasie 3h 52min:
 - SO_2 : $y = 6\text{E-}11x^6 - 4\text{E-}08x^5 + 1\text{E-}05x^4 - 0,0007x^3 - 0,0287x^2 + 1,105x + 397,66$
 $R^2 = 0,8994$
 - NO_x : $y = 6\text{E-}11x^6 - 4\text{E-}08x^5 + 1\text{E-}05x^4 - 0,0012x^3 + 0,0304x^2 + 0,4063x + 141,15$
 $R^2 = 0,9138$
 - $\text{CO}+\text{CH}_4$: $y = 3\text{E-}10x^6 - 2\text{E-}07x^5 + 4\text{E-}05x^4 - 0,0044x^3 + 0,1979x^2 - 2,4764x + 10,683$
 $R^2 = 0,9549$
- Dla wygaszania kotła WR-10 w czasie 52 min:
 - SO_2 : $y = 5\text{E-}14x^6 - 2\text{E-}10x^5 + 2\text{E-}07x^4 - 0,0002x^3 + 0,0622x^2 - 11,104x + 786,61$
 $R^2 = 0,9773$
 - NO_x : $y = 3\text{E-}14x^6 - 9\text{E-}11x^5 + 1\text{E-}07x^4 - 9\text{E-}05x^3 + 0,031x^2 - 5,1666x + 306,15$
 $R^2 = 0,9599$
 - $\text{CO}+\text{CH}_4$: $y = -3\text{E-}13x^6 + 1\text{E-}09x^5 - 2\text{E-}06x^4 + 0,0011x^3 - 0,4149x^2 + 70,678x - 1135,3$
 $R^2 = 0,9098$

Podsumowując, na zmianę wielkości emisji związków znaczny wpływ ma sposób w jaki następują zmiany obciążenia. Niektóre ciepłownie realizowały to poprzez zmianę prędkości posuwu rusztu, a co za tym idzie, zmniejszenie ilości spalanego węgla, drugie zaś, wpływały na proces spalania tylko zmianą współczynnika nadmiaru powietrza. Współczynnik ten dobiera się w zależności od rodzaju paliwa i paleniska lub komory spalania, w której przebiega spalanie. W paleniskach na paliwa stałe z rusztem mechanicznym współczynnik nadmiaru powietrza λ powinien wynosić od 1,3 do 1,6. [12] Przy $\lambda = 1$ temperatura osiąga maksimum, a przy $\lambda > 1$ maleje ze wzrostem λ wskutek podgrzewania dostarczonego powietrza nie biorącego udziału w spalaniu. Przy $\lambda < 1$ temperatura spalania maleje ze wzrostem strat niezupełnego i niecałkowitego spalania. W celu maksymalnego wykorzystania paliwa pod względem energetycznym dąży się do spalania całkowitego, gdy w produktach spalania nie ma stałych składników palnych oraz do spalania zupełnego, czyli spalania na produkty niepalne.

Zmiana współczynnika nadmiaru powietrza ma wpływ na charakter spalania. Spalanie niezupełne może być spowodowane niedostateczną ilością powietrza doprowadzonego do spalania, niedoskonałym wymieszaniem paliwa z powietrzem lub brakiem czasu na ukończenie reakcji chemicznej. W takich warunkach powstaje tlenek węgla. Metan CH_4 atmosferyczny jest pochodzenia naturalnego, ale także wynikiem niezupełnego spalania paliw węglowodorowych [94]. Metan jest jednym ze składników powstających podczas utleniania węglowodorów wyższych, a sam też generuje węglowodory wyższe w procesie utleniania. Sam mechanizm opisujący utlenianie metanu wydaje się obecnie dobrze poznany, chociaż bierze w nim udział około kilkudziesięciu związków chemicznych. Schemat reakcji utleniania metanu opisany jest 123 reakcjami [13]. Daje to pogląd na skomplikowany charakter zachodzących reakcji i to tylko dla metanu. W samym palenisku zachodzi szereg reakcji, które nie są zbadane. Znany jest efekt końcowy spalania, którym są stężenia metanu w spalinach.

W przeprowadzonych badaniach wielkości ładunku emisji ditlenku siarki związane były głównie z zawartością siarki w paliwie i ilością spalanego węgla.. Wraz ze wzrostem mocy kotła, zwiększano ilość spalonego węgla i zawartość SO_2 w spalinach wzrastała proporcjonalnie do ilości spalonego węgla. Ładunki NO_x głównie zależały od temperatury

panującej w komorze spalania i ilości spalanego węgla. Chlorowodór i fluorowodór obecne są w spalonym paliwie. W przypadku HF i HCl wyniki pomiarów wykazywały przekroczenie obowiązujących standardów emisji dla obiektów spalających odpady [11].

Wszystkie emitowane związki są szkodliwe dla środowiska naturalnego i zdrowia ludzi. Przeprowadzone w części badawczej pomiary eksperymentalne służyły do określenia przypuszczalnej więzi przyczynowo-skutkowej różnych zjawisk oraz określenia wielkości stężenia emisji zanieczyszczeń powietrza podczas niestabilnej pracy kotłów. W przyszłości istnieje możliwość wykorzystania ich do uwzględnienia w optymalnym z punktu widzenia efektów spalania, również aspektu minimalizacji rozpatrywanych emisji zanieczyszczeń gazowych. W przypadku braku możliwości ograniczenia tych emisji do wielkości dopuszczalnych w trakcie optymalnego (technologicznie, ekonomicznie i ekologicznie) prowadzenia pracy ciepłowni (kotła), określone wskaźniki emisji będą mogły służyć jako podstawa do doboru technologii ich ograniczania.

4. Podsumowanie

Wykonane w kraju analizy wskazują, że pozycja istniejących i nowych kotłów rusztowych na rynku ciepłowniczym nie zostanie osłabiona rosnącym zużyciem gazu w Polsce. Z punktu widzenia uwarunkowań ekonomicznych, najlepszym rozwiązaniem dla kotłów istniejących jest ich modernizacja, mająca na celu wzrost ich sprawności oraz zmniejszenie emisji substancji zanieczyszczających atmosferę. Kotły rusztowe osiągają praktycznie średnioroczną sprawność około 70÷75%. Główną przyczyną tak niskiej sprawności jest niewłaściwy dobór parametrów pracy kotła w zależności od wymaganej wydajności.

Początkowo kotły rusztowe prowadzone były według pomiaru temperatury spalin oraz obserwacji strefy spalania. Duża bezwładność tego typu kotłów oraz naturalna skłonność obsługi do unikania nadmiaru pracy powodują, że w ten sposób prowadzone spalanie jest odległe od możliwego do osiągnięcia optimum, a tym samym osiągana sprawność jest niska. Mimo, że sposób ten nie przystaje do obecnego stanu techniki jest on nadal stosowany w wielu zakładach i ciepłowniach.

Najbardziej rozpowszechniony jest jednak sposób sterowania, w którym dobór ilości powietrza odbywa się według wskazania analizatora CO₂ lub O₂. Sposób ten jest powszechnie uważany za najlepszy z możliwych podczas gdy w rzeczywistości rzadko kiedy uzyskiwana w wyniku jego stosowania sprawność przekracza 75%.

Obecnie w wielu zakładach ciepłowniczych proces spalania w kotle prowadzony jest według jego aktualnej sprawności. Osiągnięte, w wyniku stosowania tej metody, oszczędności paliwa i ograniczenie emisji zanieczyszczeń są duże, a czas zwrotu nakładów na automatyzację i opomiarowanie kotła jest często krótszy od roku. [14÷17].

W literaturze znajduje się niewiele publikacji, które jasno określają wpływ rodzaju paliwa na wskaźniki emisji źródeł ciepłowniczych zasilających krajowe systemy ciepłownicze. Z nielicznych publikacji zajmujących się tą problematyką można wymienić [18].

Zaproponowana metodyka obliczeń wskaźników emisji dla spalin w warunkach odbiegających od normalnych będzie pomocna w decyzji optymalnego wyboru działań modernizacyjnych oraz doboru urządzeń oczyszczających dla pyłów i powstających gazowych substancji zanieczyszczających.

Wdrożenie zaproponowanej metody obliczeń jest zagadnieniem ważnym w krajowej ochronie powietrza z uwagi na dużą liczbę istniejących kotłowni z kotłami rusztowymi oraz dużą ilość emitowanych zanieczyszczeń w warunkach odbiegających od normalnych. Jednocześnie

może przyczynić się do wprowadzenia w przepisach prawnych odpowiednich standardów emisji z procesów spalania podczas pracy kotła w niestabilnych warunkach.

Literatura

- [1]. **Gębska K., Jankiewicz M.** Nowe zasady wykonywania wniosku o wydanie pozwolenia na wprowadzanie emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych do powietrza dla źródeł ciepłowniczych – *Praca dyplomowa magisterska Zakład Ochrony i Kształtowania Środowiska Politechnika Warszawska*. Warszawa, 2000 r.
- [2]. **Juda-Rezler K.** Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko. *Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*. Warszawa 2006.
- [3]. **Tainio M., Juda-Rezler K., Reizer M., Warchalowski A.** Future climate and adverse health effects caused by fine particulate matter air pollution: case study for Poland. *Regional Environmental Change*, 2013, Vol.13(3), pp.705-715
- [4]. **Juda-Rezler K.** Uniwersalna funkcja celu dla zintegrowanych modeli oceny wpływu zanieczyszczeń powietrza na środowisko. *Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej* 2004.
- [5]. **Chen Z., Wang J-N., Ma G-X., Zhang Y-S.** China tackles the health effects of air pollution. *The Lancet*, 2013, Vol.382(9909), pp.1959-1960
- [6]. **Juda J., Chróściel St.** Ochrona powietrza atmosferycznego. *Wydawnictwo PW, Warszawa, 1987 r.*
- [7]. Materiały udostępnione przez SEFAKO S.A.
- [8]. **Pronobis M.** Modernizacja kotłów energetycznych. *Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa, 2002 r.*
- [9]. **Chróściel St., Nowicki M.** Problemy obliczeniowe w ochronie atmosfery. *Wydawnictwo PW, Warszawa, 1977 r.*
- [10]. **Majewski K.** Materiały wykładowe: Kotły parowe i wodne. Zajęcia projektowe. Obliczanie powierzchni rusztu mechanicznego taśmowego. *Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Al. Jana Pawła II 37 31-864 Kraków*
- [11]. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. 2014, poz. 1546).
- [12]. **Wiśniewski S.** Termodynamika techniczna. *Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2005 r.*
- [13]. **Kordylewski W.** Spalanie i paliwa. *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008 r.*
- [14]. **Szlęk A., Wilk R.** Modernizacja kotłów rusztowych jako sposób na zmniejszenie zużycia paliwa i emisji substancji toksycznych. *Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska. Nowoczesne Ciepłownictwo, grudzień 1998 r.*
- [15]. **Szlęk A.** Charakterystyka spalania węgla jako podstawowy parametr rzutujący na sprawność kotła. *Gospodarka Paliwami i Energią (Nr 5), 1997 r.*
- [16]. **Szlęk A., Wilk R.** Perspektywy użytkowania kotłów rusztowych w Polsce. *Nowoczesne Ciepłownictwo (Nr 11), 1999 r.*
- [17]. **Szlęk A., Wilk R., Widziszowski R., Kowalewski W.** Określanie sprawności energetycznej kotła rusztowego w warunkach zmiennego obciążenia cieplnego. *II konferencja Założenia i realizacja kompleksowej modernizacji systemów ciepłowniczych, Korbielów 1996 r.*
- [18]. Główny Urząd Statystyczny: <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2012-i-2013,4,9.html>
data dostępu: 16.07.2015