

Ryszard PARYS

BUTiH „EKOKAL”, Kalety

## NIEKTÓRE ZJAWISKA ZWIĄZANE Z WPROWADZANYMI ZMIANAMI W INSTALACJACH POWIETRZA KOTŁÓW RUSZTOWYCH

**Streszczenie.** W ostatnich latach wiele kotłów rusztowych zostało zmodernizowanych. Często zmiany dotyczyły instalacji powietrza, a w szczególności sposobu regulacji wydajności i spiętrzenia wentylatorów, sposobu doprowadzenia powietrza do kotła, sposobu regulacji rozdziału powietrza itp. W artykule starano się wymienić niektóre wprowadzane zmiany oraz porównać sytuację po ich wprowadzeniu ze stanem pierwotnym. Starano się również omówić wpływ wprowadzonych zmian na proces spalania i sprawność kotłów. Podano przykłady kotłów mających różne rozwiązania poszczególnych części instalacji powietrza. Dla niektórych przypadków analizy uzupełniono wynikami pomiarów. Podkreślono potrzebę bardziej wnikliwego analizowania zastosowanych rozwiązań i upowszechniania najlepszych.

## SOME PHENOMENA RELATED TO INTRODUCED MODIFICATIONS IN THE AIR INSTALLATION OF STOKER-FIRED BOILERS

**Summary.** Many stoker-fired boilers have been modernized recently. Modifications often concerned air installation; in particular they referred to the way of capacity regulations and the pile-up of fans, the way of supplying air to the boiler and the way of regulation of air distribution etc. The first aim of present article is to enumerate some introduced modifications and to analyse the impact of all modifications on primal performance. The other aim is to describe the influence of modifications on the combustion process and on the efficiency of boilers. Examples of boilers with various solutions to individual parts of air installation have been provided. Some examples of present analysis have been supplemented with results of measurements. The need for more

in-depth analysis of applied solutions and the need to promote the best ones have been emphasized.

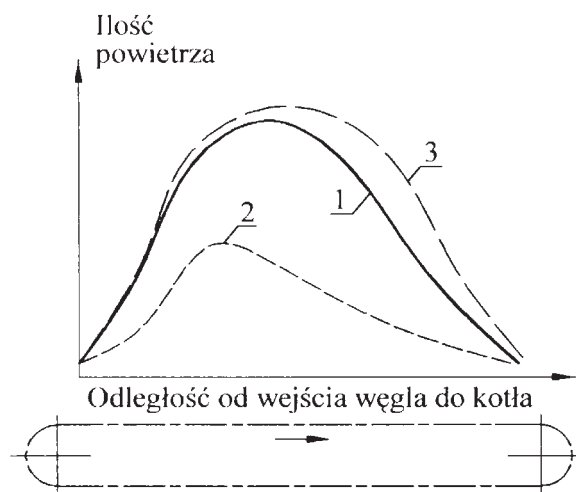
## 1. Wprowadzenie

W grupie kotłów wodnych i parowych o wydajnościach od kilkuset kilowatów do kilkudziesięciu megawatów w dalszym ciągu podstawową rolę odgrywają kotły rusztowe. Na początku lat dziewięćdziesiątych oceniano, że w kraju pracuje kilkanaście tysięcy wysłużonych kotłów rusztowych [1] oraz, że spala się w nich ok. 35 mln ton węgla kamiennego rocznie [2]. Obecnie liczby te zmieniły się, lecz nadal pracuje wiele takich kotłów i prawdopodobnie kotły rusztowe będą jeszcze w użyciu przez wiele lat [12]. Wymagania ekonomiczne, ekologiczne i inne z jednej strony oraz możliwości techniczne z drugiej strony sprawiły, że przeprowadzono szereg różnorodnych modernizacji tych kotłów. Wiele modernizacji dotyczyło instalacji powietrza. Zakres modernizacji wynikał najczęściej z ilości posiadanych przez inwestora w danym czasie środków oraz z lokalnych uwarunkowań. W związku z tym istnieje wiele rozwiązań, które mogłyby się wydawać podobne, a jednak w swoim funkcjonowaniu różnią się. Trudno jest wymienić wszystkie rozwiązania. Poniżej wymieniono rozwiązania napotkane podczas wykonywania pomiarów cieplnych kotłów rusztowych na różnych obiektach w kraju. Większości wprowadzonych zmian towarzyszą określone zjawiska, nie zawsze zauważane, wpływające na procesy zachodzące w instalacjach powietrza i w samym kotle, na które poniżej zwrócono uwagę.

## 2. Właściwe doprowadzenie powietrza do spalania

Wiadomo, że powietrze trzeba dostarczyć w sposób optymalny, czyli tak, aby zawarty w powietrzu tlen był dostarczony tam, gdzie jest potrzebny do spalania i aby nie było go w nadmiarze tam, gdzie nie potrzeba. Należy zadbać, aby dostarczenie powietrza odbyło się jak najmniejszym kosztem, przy zachowaniu potrzebnych parametrów takich jak temperatura, ciśnienie, prędkość.

W przypadku paleniska z rusztem mechanicznym proces spalania odbywa się przy ciągłym przemieszczaniu się warstwy paliwa. Orientacyjne przebiegi zapotrzebowania powietrza w poszczególnych miejscach rusztu podano na rys. 1 (patrz również [3–5]). Grubość warstwy węgla na ruszcie ulega zmianie w miarę oddalania się od miejsca wejścia węgla do kotła. Opory przepływu powietrza przez warstwę węgla zależą od jakości węgla, jego sortymentu, wilgoci i innych właściwości fizycznych i chemicznych, ale także od grubości war-



Rys. 1. Orientacyjne teoretyczne przebiegi zapotrzebowania powietrza w poszczególnych miejscach rusztu przy wydajności nominalnej (1), minimalnej (2) i przy przeciążeniu (3)

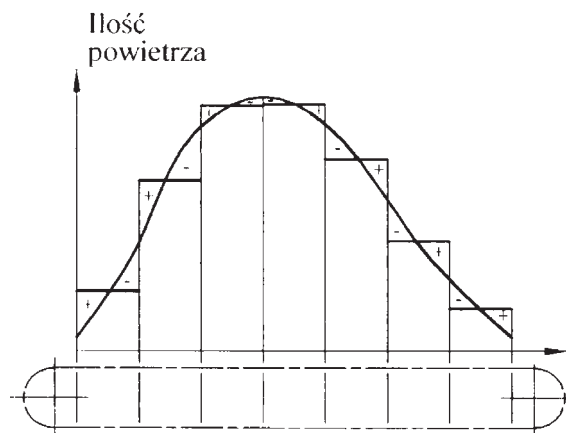
stwy, sposobu „położenia” węgla na ruszcie (rozluźnienie węgla na pokładzie rusztu, zróżnicowanie ziarna na szerokości rusztu, jednakowa wysokość warstwy na szerokości itp). Zmieniają się one w miarę stopnia wypalania oraz w zależności od przemian popiołu. Dlatego zarówno zapotrzebowanie powietrza jak i ilość powietrza dostarczona w danym miejscu rusztu zależy od szeregu czynników. Aby zapewnić w miarę optymalne warunki spalania prowadzona jest regulacja poprzez zastosowanie stref podrusztowych. Na rys. 2 pokazano ilości powietrza przy strefowej regulacji ilości powietrza.

Nadrzędnym celem wszelkich modernizacji jest stworzenie możliwości jak najlepszego dopasowania schodkowej zależności na rys. 2 do orientacyjnego teoretycznego przebiegu zapotrzebowania. Należy dodać, że teoretyczne zapotrzebowanie powietrza dla danego miejsca rusztu znane jest tylko w przybliżeniu.

### 3. Instalacje powietrza kotłów rusztowych

#### 3.1. Lokalizacja wentylatorów powietrza podmuchowego i wynikające stąd uwarunkowania

Najczęściej wentylatory powietrza można spotkać na poziomie odzūlaczy (czyli zazwyczaj poniżej poziomu gruntu). Rzadko można spotkać wentylatory na tzw. poziomie palacza. W kotłach WR 25 wentylatory powietrza były oryginalnie



Rys. 2. Dopływ ilości powietrza do poszczególnych części rusztu przy strefowej regulacji ilości powietrza (- niedobór powietrza, + - nadmiar powietrza)

nalnie zabudowane bezpośrednio nad III ciągiem kotła stanowiącym podgrzewacz powietrza, jednak w wielu przypadkach zostały przeniesione na poziom odzūżlania, ale też czasami nad II ciąg. Zasadniczo wentylatory powietrza znajdują się w pobliżu kotła, czyli w budynku kotłowni, ale niekiedy można spotkać je na zewnątrz.

Lokalizacja wentylatora nie ma decydującego znaczenia na sposób pracy kotła. Zastanawiając się jednak nad przyczyną różnych lokalizacji wentylatorów, a szczególnie nad przyczynami zmian lokalizacji wentylatorów dla już istniejących kotłów można zauważyć, że:

- przy kotle WR 25 lokalizacja na górze III ciągu sprawia, że instalacja powietrza jest zwarta i zawiera jedynie krótkie odcinki kanałów powietrza (wlot ciepłego powietrza z góry kotłowni – wentylator – podgrzewacz powietrza – rozdział do stref pod ruszt), jednak wentylator u góry powoduje przenoszenie się wibracji na konstrukcję oraz utrudnia remont podgrzewacza powietrza oraz samego wentylatora,
- występujące niekiedy przeniesienie wentylatorów poza kotłownię wynika z braku miejsca w kotłowni i jest związane z wytwarzanymi wibracjami i hałasem.

### 3.2. Sposoby regulacji ilości powietrza podawanego do kotła i ich specyfika

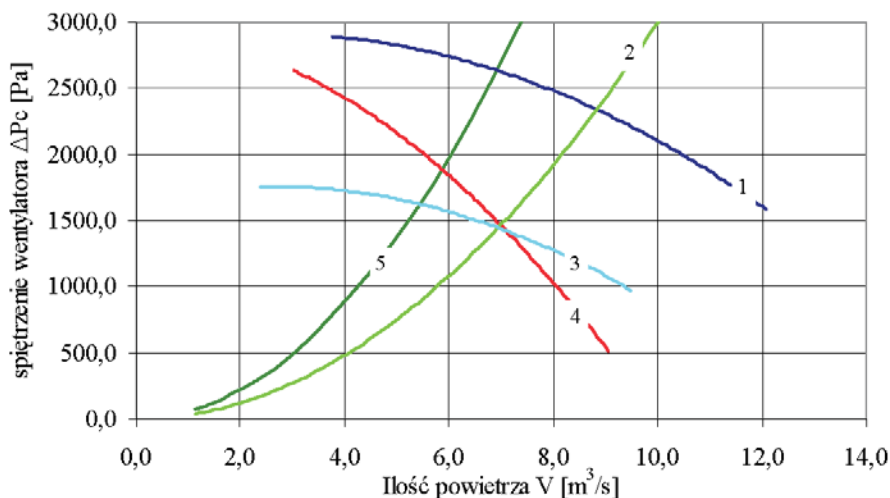
Mimo coraz częściej stosowanych układów regulacji ilości powietrza w instalacji podmuchowej poprzez zmianę obrotów wentylatora, można jeszcze często spotkać regulację przy pomocy układów kierowniczych, a nawet po-

przez zwykłe dławienie przy pomocy układów żaluzjowych, klap czy wręcz przez przysłanianie części kanału.

Na rys. 3 przedstawiono współpracę wentylatora z siecią w każdym z tych przypadków. Jeżeli charakterystyka wentylatora w pełni otwartego przy nominalnych obrotach wirnika ma przebieg tak jak krzywa 1 (dane jak dla wentylatora WWOax 63,  $b = 1,8$  przy obrotach  $n = 1465$  obr/min), a krzywa oporów sieci jak 2 to wydajność wentylatora wyniesie ok.  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Jeśli jednocześnie wiadomo, że dla optymalnego spalania przy wymaganej wydajności kotła potrzeba ok.  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  to można to uzyskać w następujący sposób:

- zmieniając obroty wirnika wentylatora na  $n \cong 1150$  obr./min, wtedy punkt pracy przechodzi do przecięcia krzywej 2 i 3;
- zmieniając położenie kierownic wentylatora (jeśli takie posiada), wtedy punkt pracy przechodzi do przecięcia krzywej 2 i 4;
- wprowadzając dodatkowe dławienie (klapa, żaluzja, przysłanianie części kanału) w instalacji i wtedy punkt pracy wentylatora przesuwa się po krzywej 1 do przecięcia z krzywą 5, przy czym część ciśnienia zostaje wytracona na dodatkowym oporze a ciśnienie „dyspozycyjne” dla pozostałej części instalacji jest takie jak w pozostałych przypadkach, gdyż wynika z odjęcia od spiętrzenia wentylatora straty ciśnienia na dodatkowym oporze.

Każdy z tych sposobów ma swoją specyfikę i ograniczenia. Regulacja polegająca na dławieniu przepływu sprawia, że część energii doprowadzonej do napędu wentylatora jest tracona na dodatkowym elemencie dławiącym (w przypadku c)) lub na zintegrowanych z wentylatorem kierownicach (w przypadku b)). W przypadku b) można stratę tę nazwać obniżeniem spraw-



Rys. 3. Różne sposoby regulacji wydajności wentylatora

ności wentylatora przy jego pracy w innym niż optymalnym obszarze pracy. Natomiast w przypadku a) wytwarzany jest potrzebny strumień powietrza o odpowiednim ciśnieniu. Przy tej metodzie, przy zmniejszeniu ilości powietrza o 20 %, prawie o 50% zmniejsza się zużycie energii przez silnik wentylatora. Tak więc, wydawałoby się, że zastosowanie przetwornic częstotliwości, pozwalających w łatwy sposób zmieniać obroty wentylatorów i tym samym parametry powietrza, jest rewelacyjnym rozwiązaniem. Tymczasem nie zawsze tak jest.

Bardzo często wymaga się, aby kotły pracowały w bardzo szerokim zakresie obciążeń [6]. Zdarza się, że w zakresie od ok. 20% wydajności nominalnej (w lecie na potrzeby ciepłej wody) do 140% (w zimie przy przeciążeniu na potrzeby ogrzewania). Wentylatory powietrza są dobierane dla maksymalnej wymaganej wydajności a przy minimalnej wydajności trudno jest zachować odpowiednią wydajność, ciśnienie za wentylatorem i odpowiednie pochylenie charakterystyki.

Łatwość zmiany obrotów sprawia, że obsługa kotła często nadmiernie korzysta z tej regulacji zaniedbując jednocześnie wymagającą większego wysiłku regulację rozpiętości do stref. Przy małych wydajnościach kotła prowadzi to często do pracy z niskim ciśnieniem pod rusztem (część stref zbyt mocno otwarta). Z doświadczeń zdobytych podczas prowadzenia pomiarów kotłów wynika, że aby rozdział powietrza na strefy był poprawny i aby spalanie na ruszcie odbywało się poprawnie, ciśnienie powietrza w skrzyni przed rozdziałem na strefy powinno wynosić przynajmniej ok. 600 Pa (np. [7]). W układzie sterowania wentylatorem można by zastosować blokadę nie dopuszczającą do obniżenia ciśnienia poniżej zadanej wartości (jako dolne ograniczenie częstotliwości w układzie zasilania silnika wentylatora), jednak autor podczas pomiarów kilkudziesięciu kotłów wyposażonych w wentylatory powietrza o zmiennych obrotach, nigdy nie spotkał takiego rozwiązania. Przy zbyt małych oporach i małej wydajności kotła może się zdarzyć, że nie będzie można osiągnąć wymaganej wydajności wentylatora przy założonym poziomie ciśnienia.

Podczas regulacji ilości powietrza przez zmianę obrotów wentylatora wydajność zmienia się liniowo, ciśnienie wraz z kwadratem obrotów. Sprawia to, że charakterystyki wentylatora są płaskie w przeciwieństwie do regulacji przy pomocy kierownic, gdzie wraz z zamykaniem kierownic charakterystyki stają się coraz bardziej strome. Szczególnie przy małej wydajności kotła niskie ciśnienie i płaska charakterystyka wentylatora sprawiają, że przy lokalnym wzroście oporów przepływu w jakiejś części rusztu powietrze omija to miejsce, natomiast ciśnienie pod rusztem tylko nieznacznie wzrasta, co nie pozwala „rozbić” warstwy o większych oporach. Powoduje to słabe wypalenie węgla w niektórych miejscach i wzrost straty niecałkowitego spalania w zu-

zlu. Przy regulacji kierownicami, przy takim samym wzroście oporów, przyrost ciśnienia jest znacznie większy.

Teoretycznie można wyliczyć dla każdego punktu współpracy sieci z wentylatorem, wartość  $k$  charakteryzującą stopień przyrostu ciśnienia na wentylatorze w odniesieniu do zmiany oporów przepływu instalacji. Jeśli na przykład na rysunku 3 wziąć pod uwagę krzywą 1 (nazwaną  $g(V)$ ) oraz krzywą 2 (nazwaną  $f(V)$ ) to  $k$  można wyliczyć np. z zależności:

$$k = \frac{-g'(V_0)}{f'(V_0) - g'(V_0)}, \quad (1)$$

gdzie:  $g'(V_0)$ ,  $f'(V_0)$  pochodne funkcji  $g(V)$ ,  $f(V)$  w punkcie przecięcia krzywych.

Przy płaskiej charakterystyce wentylatora, czyli  $\Delta p_c = g(V)$  wartość  $k$  (1) będzie bliska zeru, co nie jest korzystne dla właściwego przepływu powietrza przez ruszt. Tak więc, wartość (1) może służyć dla oceny poprawności doboru wentylatora.

W związku z powyższym zdarzają się modernizacje polegające na zabudowie dodatkowego wentylatora powietrza do pracy kotła z małą wydajnością [8]. Wtedy oprócz odpowiedniej wydajności i spiętrzenia zapewnia się również bardziej korzystne nachylenie charakterystyki wentylatora dla przewidywanego zakresu pracy.

### 3.3. Sposoby rozdziału powietrza pod ruszt

Jak już wspomniano, rozdział powietrza pod ruszt odbywa się zazwyczaj w sposób strefowy. Ilość stref bywa różna, od kilku do kilkunastu. Większa ilość stref pozwala na dokładniejsze dopasowanie podawanej ilości powietrza do teoretycznego zapotrzebowania (Rys. 2). Jednak przy dużej ilości stref może dochodzić do wzrostu stosunku powierzchni martwej do całej powierzchni rusztu. Przy większej ilości stref konstrukcja, a później regulacja, stają się bardziej skomplikowane. Można się zastanawiać czy warto dokładnie regulować rozpływ w sytuacji, gdy krzywa teoretycznego zapotrzebowania nie jest dokładnie znana, gdyż zależy od wielu czynników. Trzeba znaleźć optymalną ilość stref, co pociąga za sobą szerokość strefy, czyli przy danej szerokości rusztu powierzchnię, dla której indywidualnie możemy regulować strumień powietrza. Zazwyczaj ilość stref wynosi 5 do 7. Przykładowo pomiary kotła WR 25 [9] wyposażonego w 10 stref podrusztowych, z czego 8 automatycznie sterowanych wykazały, że sprawność paleniska w tym przypadku niewiele się różniła od wyników uzyskanych podczas pomiarów podobnych kotłów wyposażonych w mniejszą ilość stref regulowanych ręcznie (np. [8]).

Przy małej ilości stref można spotkać, szczególnie przy spalaniu odpadów drewna na ruszcie schodkowym, zasilanie poszczególnych stref poprzez osob-

ne wentylatory z regulowanymi obrotami [10]. Jest to rozwiązanie wygodne, aczkolwiek przy podawaniu powietrza ze wspólnego kanału, na przykład z za podgrzewacza powietrza, mogą wystąpić problemy właściwe równoległej pracy kilku wentylatorów.

Przy większej ilości stref powietrze z jednego lub dwóch wentylatorów kierowane jest do jednej lub dwóch skrzyń powietrza (kolektorów). Dalej poprzez wyloty, w których zabudowane są elementy regulacyjne dostaje się do stref podrusztowych. Inna grupa rozwiązań to odprowadzenie od skrzyni powietrza (kolektora) kanałów do każdej strefy i zabudowanie w tych kanałach elementów regulacyjnych, czyli różnego rodzaju klap jedno i dwustronnych, zasuw i żaluzji. W każdym przypadku dąży się do uzyskania poprawnego działania przy jednoczesnym zachowaniu prostej, czyli niezbyt drogiej konstrukcji.

O sposobie regulacji, oprócz wykonania organu regulacyjnego, decyduje niekiedy nawet sposób wykonania dźwigni. Na przykład, przy małym zakresie przewidzianego ruchu dźwigni trudno jest precyzyjnie ustawić ilość powietrza, a gdy dźwignia ma przewidziane blokowanie w określonych miejscach wtedy regulacja jest skokowa.

Istnieje również pewien związek pomiędzy lokalizacją dźwigni i ich konstrukcją a częstością ich używania przez obsługę. Zakres i sposób stosowania regulacji ilości powietrza do poszczególnych stref jest bardzo różny na poszczególnych obiektach. W wielu przypadkach na podstawie obserwacji spalania na pokładzie rusztowym, obsługa według własnych doświadczeń ustawia ilość powietrza do poszczególnych stref. Istnieją obiekty, gdzie dodatkowo obsługa ma do dyspozycji obraz rozkładu ciśnień w strefach na manometrze cieczowym bateryjnym. Raz ustawione położenia dźwigni są zmieniane dopiero po zmianie warunków pracy kotła lub po wystąpieniu istotnego zakłócenia tej pracy, czyli rzadko. Kiedy indziej, w sytuacji, gdy dźwignie od regulacji ilości powietrza sprowadzono do przodu kotła (obok napędu rusztu), obsługa wykorzystywała je jako podstawowy element regulacji ciśnienia pary.

Coraz częściej można spotkać rozwiązania, gdzie dla każdej strefy zabudowano przetwornik ciśnienia umożliwiający odczyt ciśnienia w systemie wizualizacji lub przy pomocy wskaźników na szafie pomiarowej. Również coraz częściej elementy regulacyjne są wyposażane w siłowniki pozwalające na zdalne sterowane. Niekiedy stosowane są rozwiązania jeszcze bardziej zaawansowane, gdzie układ sterowania ma zaprogramowane dla każdej wydajności z uwzględnieniem jakości węgla odpowiednie otwarcia stref, a realizacja ustawień przeprowadzana jest już w sposób automatyczny. Niestety niekiedy spalanie na ruszcie jest „nieprzewidywalne”, to znaczy, że nawet przy ustawieniach kotła, które wielokrotnie się sprawdziły proces spalania przebiega niewłaściwie i wtedy wymagana jest obserwacja pokładu rusztu i skorygowanie nastaw. Można jednak spotkać kotły rusztowe mające w założeniu praco-



wać prawie bezobsługowo, a nawet takie, w których pokuszono się o czasowe zamurowanie włączów.

### **3.4. Ciśnienie i temperatura powietrza, opory instalacji powietrza pierwotnego**

Można spotkać wiele modernizacji wpływających na zmianę oporów przepływu powietrza przez instalacje. Zdarzają się przypadki, gdzie chcąc doprowadzić ciepłe powietrze spod stropu kotłowni prowadzony jest kanał o zbyt małym przekroju i tym samym rosną niepotrzebnie opory sieci. Zmienia to położenie punktu pracy na charakterystyce wentylatora i najczęściej zwiększa zużycie energii na potrzeby własne niwelując niekiedy zysk z wykorzystania cieplejszego powietrza. Zdarza się też przy braku miejsca w kotłowni, że ciepłe powietrze spod stropu kierowane jest nie izolowanym kanałem na zewnątrz kotłowni. Czasami w kanałach na ssaniu wentylatorów budowane są elementy spiętrzające, służące do pomiaru ilości powietrza, wprowadzające dużą stratę ciśnienia.

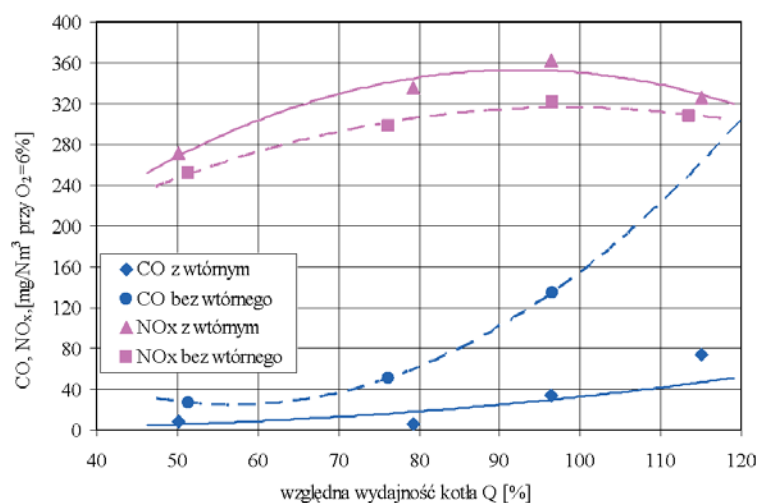
Powietrze podawane do kotłów rusztowych w wielu przypadkach nie jest podgrzewane. Niekiedy występują podgrzewacze powietrza ciepłem z obcego źródła (wymyenniki woda-powietrze lub para-powietrze). Czasami podgrzewacz powietrza umieszczony jest w ciągu spalin i stanowi jedną z powierzchni wymiany ciepła. Bywają modernizacje polegające na zabudowie w miejsce podgrzewacza powietrza podgrzewacza wody, ale są też i takie, że dobudowuje się podgrzewacz powietrza (np. ciepłem z obcego źródła).

### **3.5. Instalacja powietrza wtórnego**

W kotłach rusztowych można spotkać różne rozwiązania instalacji powietrza wtórnego. Pracują też kotły rusztowe, które nie mają instalacji powietrza wtórnego, bo takiej nie zaprojektowano. Są i takie, w których zdemontowano silnik wentylatora lub cały wentylator, bo były potrzebne gdzie indziej lub uznano, iż instalacja powietrza wtórnego jest niepotrzebna. W przypadkach, gdy instalacja istnieje nierzadko nie jest ona uruchamiana. Spośród istniejących instalacji można spotkać i takie, gdzie powietrze do komory paleniskowej podawane jest z wylotu wentylatora powietrza podmuchowego, co ze względu na niskie ciśnienie nie może zapewnić odpowiedniej prędkości na wylocie z dysz i wtedy nie może wnikać w głąb komory paleniskowej. Spotyka się czasami dysze powietrza wtórnego skierowane do kotła z tyłu komory paleniskowej gdzie przy mniejszej wydajności kotła nie przebiega już praktycznie spalanie. Wielkość dysz i ich kształt niejednokrotnie wynika z możliwości zabudowy a nie z rzeczywistych potrzeb. Dysze o małym przekroju i o dużym stosunku długości brzegu do powierzchni wymagają znacznych ciśnień, aby powietrze mogło wnikać na znaczącą głębokość komory paleniskowej. Tym-

czasem często w kanałach za wentylatorami powietrza wtórnego są przymykane kłapy lub wentylatory te mają możliwość regulacji obrotów i pracują z małą wydajnością i małym spiętrzeniem. Ponadto, powstają pytania: przy jakim obciążeniu kotła należy podawać powietrze wtórne, w które rejony kierować największą jego ilość, z jaką prędkością? Często na pytania te trudno odpowiedzieć, gdyż trudno jest ocenić bezpośrednio wpływ tego powietrza, co niekiedy może prowadzić do niewłaściwego korzystania z instalacji.

Przykładowo na rys. 4 pokazano zależność stężenia  $\text{NO}_x$  i CO od wydajności przy załączonej i wyłączonej instalacji powietrza wtórnego dla kotła WR 25-014 (patrz również [13, 6]). Przy dużej wydajności dla utrzymania odpowiednich stężeń CO wskazana była praca z powietrzem wtórnym, co jednak nieznacznie zwiększało stężenia  $\text{NO}_x$ .



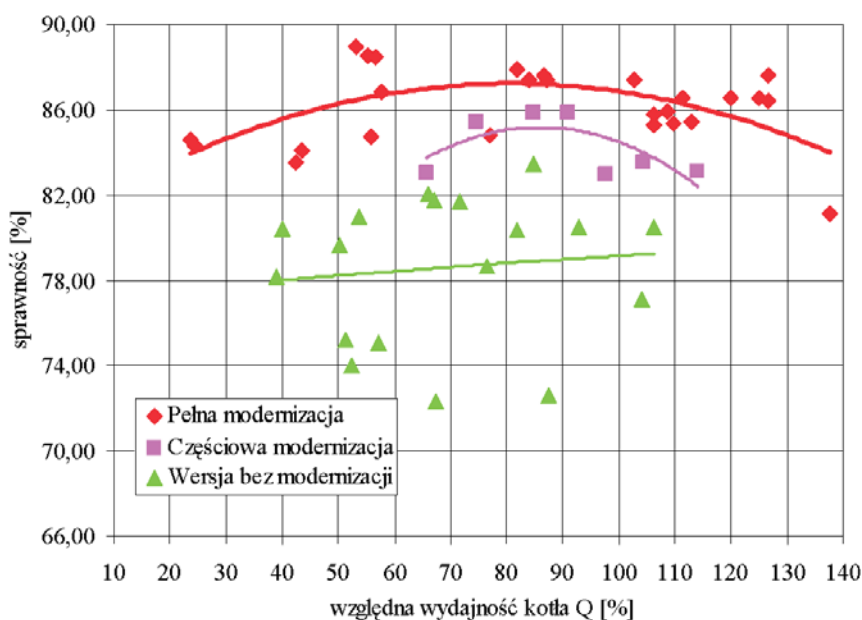
Rys. 4. Stężenie  $\text{NO}_x$  i CO w spalinach przy włączonym i wyłączonym wtórnym powietrzu

### 3.6. Trudności z oceną efektów modernizacji instalacji powietrza

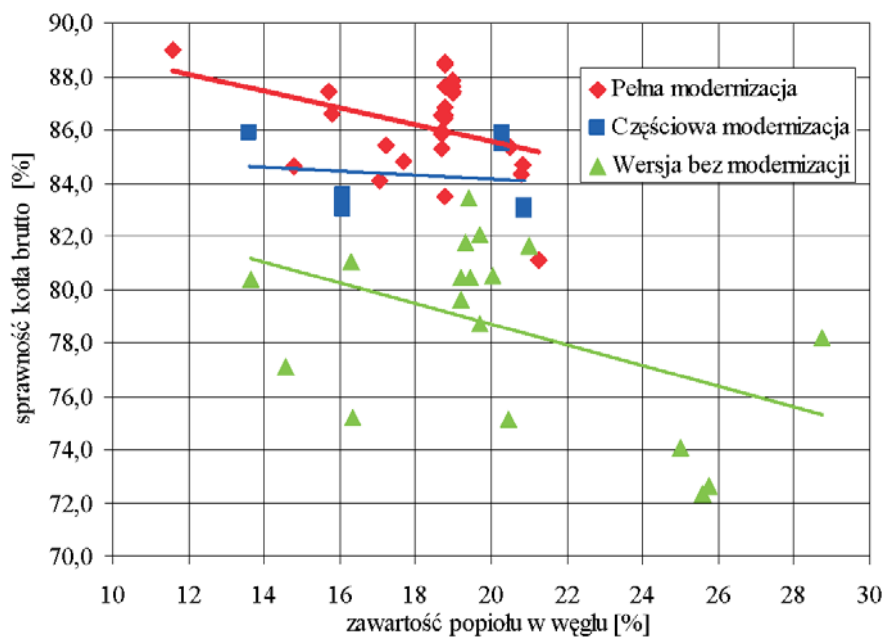
Istnieje różnorodność rozwiązań instalacji powietrza i trudno je skrótowo przeanalizować, a tym bardziej ocenić poszczególne rozwiązania bez wchodzenia w szczegółowe analizy. Chcąc porównywać poszczególne rozwiązania należy mieć na uwadze, że na jakość pracy kotła oprócz cech konstrukcyjnych całego kotła (nie tylko instalacji powietrza) wpływają również inne czynniki, z których główne to jakość paliwa, sposób jego podania na ruszt, stan rusztu i powierzchni wymiany oraz sposób prowadzenia kotła. Dlatego można spotkać kotłownie, gdzie obok siebie pracują kotły tego samego typu, mające w różny sposób rozwiązane instalacje powietrza, uzyskujące podobne parametry.

try (np. [11]). Gdzie indziej kotły mające jednakowe instalacje powietrza, uzyskują różne parametry.

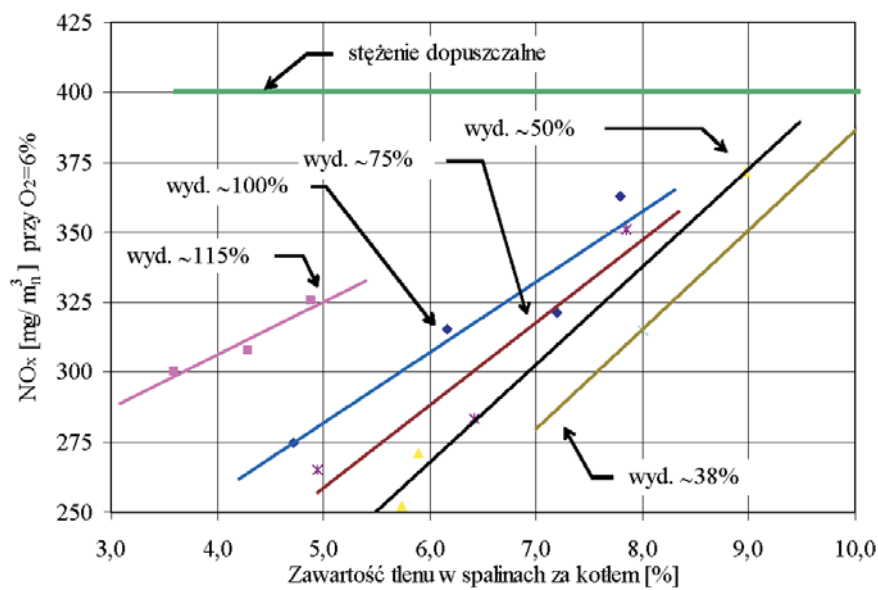
Dla ilustracji na rys. 5 pokazano sprawność brutto kotłów WR 25 w wersji pierwotnej (z różnych obiektów) oraz zmodernizowanych częściowo (zmiany w układzie powietrza podmuchowego połączone z przeniesieniem wentylatora podmuchu na poziom odzūżlania lub zastosowanie nowego, zmiany w układzie powietrza wtórnego, zabudowa w miejsce podgrzewacza powietrza dodatkowego pęczka podgrzewacza wody, zmiany w układzie pomiarów i automatyki) lub w sposób możliwie pełny (zastosowanie ścian membranowych tworzących komorę paleniskową i ściany II ciągu, eliminacja rurowego podgrzewacza powietrza i zastąpienie go dodatkowym podgrzewaczem wody, zmiana lokalizacji wentylatorów podmuchu oraz zmiany w instalacji powietrza podmuchowego, zastosowanie nowego rozwiązania wdmuchu powietrza wtórnego z przodu komory paleniskowej, zmiana typu i lokalizacji wentylatorów powietrza wtórnego, eliminacja dotychczasowej konstrukcji nośnej powyżej rusztu mechanicznego, likwidacja ciężkiego obmurza ścian kotła, obmurówka ogniotrwała ograniczona została do niezbędnego minimum czyli sklepienia nad rusztem i tylnej przybudówki rusztu, zmiany w układach AKPiA). Widać zdecydowaną różnicę w poziomie uzyskiwanych sprawności jednak należy mieć na uwadze fakt, że w przypadku kotłów w wersji pierwotnej pomiary były wy-



Rys. 5. Sprawność kotła brutto dla kotłów w różnym stopniu zmodernizowanych



Rys. 6. Sprawność kotła w zależności od zawartości popiołu w węglu

Rys. 7. Zależność stężenia NO<sub>x</sub> i zawartości O<sub>2</sub> w spalinach za kotłem przy różnych wydajnościach kotła

konywane przed kilkunastoma laty przy spalaniu gorszego paliwa niż obecnie [6], co miało duży wpływ na uzyskiwane wyniki.

Na rys. 6 sprawności kotłów przedstawione na rys. 5 uszeregowano według zawartości popiołu w węglu spalonym podczas pomiarów. Z rysunku tego widać, że jakość paliwa ma znaczący wpływ na sprawność, jednak dla paliw o porównywalnej jakości kotły zmodernizowane osiągały wyższe sprawności. Na rys. 7. pokazano stężenia  $\text{NO}_x$  w spalinach za kotłem WR 25-014 uzyskane podczas pomiarów [13]. Na rysunku tym widać wpływ ilości powietrza na emisję  $\text{NO}_x$ .

Duża ilość czynników wpływających na optymalną pracę kotłów rusztowych skłania do stwierdzenia, że jest to grupa kotłów, z których każdy należy traktować indywidualnie. Wszystkie planowane rozwiązania warto dokładnie przemyśleć, aby poprzez oszczędności podczas modernizacji nie zmniejszać oczekiwanego efektu w czasie późniejszej eksploatacji. Warto też wykonać szczegółowe pomiary eksploatacyjne przed i po przeprowadzeniu modernizacji [14], gdyż koszt takich badań jest niski w porównaniu z wartością informacji, których dostarczają.

### 3.6. Niektóre algorytmy regulacji kotłów rusztowych

Jak już wspomniano, bardzo istotnym dla optymalnej pracy jest sposób prowadzenia kotła. Dlatego, aby wykorzystać możliwości stworzone podczas modernizacji np. instalacji powietrza, należy w bieżącej pracy właściwie ustawić elementy regulacyjne kotła. Sprowadza się to do tego, że dla konkretnego kotła, dysponując określonym paliwem, aby osiągnąć wymaganą wydajność cieplną, sprawność i inne parametry pracy należy w optymalny sposób ustawić wysokość warstwy węgla oraz prędkość posuwu rusztu oraz doprowadzić odpowiednią ilość powietrza we właściwym miejscu. Sprawność kotła rusztowego będzie zależała od właściwego doboru tych parametrów, a szczególnie ilości i rozdziału powietrza. W praktyce można spotkać następujące metody realizacji tego celu (patrz również [12]):

- a) Oparcie się wyłącznie na obserwacji przez palacza strefy spalania na ruszcie i podanie powietrza zazwyczaj w nadmiarze do miejsc, gdzie na ruszcie jest niedopalony węgiel. Ustawienia są takie, aby sprawiały możliwie mało problemów eksploatacyjnych oraz, aby nie wymagały interwencji obsługi przez możliwie długi czas (oszczędzanie własnej pracy). Metoda ta, mimo, że zapewnia niezbyt wysoką sprawność, jest wciąż stosowana nie tylko tam, gdzie nie ma odpowiedniego oprzyrządowania czyli analizatorów spalin lub układów do określania na bieżąco sprawności kotła.
- b) Oparcie się na wskazaniach analizatorów spalin i utrzymywanie odpowiedniego stężenia  $\text{O}_2$  (lub  $\text{CO}_2$ ) w spalinach. Metoda ta uważana powszechnie za najlepszą ma również wady. Utrzymywanie określonego stę-

żenia  $O_2$  w spalinach nie jest równoznaczne z podawaniem optymalnej ilości powietrza (przy różnych wydajnościach wymagane są różne zawartości  $O_2$ ). Dla danej wydajności przy różnych wysokościach warstwy węgla i prędkościach rusztu optymalny rozdział powietrza powinien być inny. W wielu wypadkach błąd pomiaru zawartości  $O_2$  w spalinach jest stosunkowo duży (dokładność analizatora oraz zróżnicowanie stężenia w przekroju pomiarowym przy punktowym pomiarze daje wynik nie odpowiadający wartości średniej), a ilość powietrza ma duży wpływ na sprawność kotła.

- c) Oparcie się na bieżąco na pomiarze sprawności kotła lub wskaźnika obliczanego jako ilość wyprodukowanego ciepła odniesiona do ilości podawanego paliwa (2), co dla kotła wodnego można określać:

$$\alpha = \frac{\dot{M}(i_2 - i_1)}{hvb\rho_n} \quad (2)$$

$\dot{M}$  – strumień wody przepływającej przez kocioł,

$i_1, i_2$  – entalpia wody przed i za kotłem określona na podstawie pomiaru temperatur,

$h$  – wysokość warstwy węgla na ruszcie (przy rusztach z warstwownicą jest to bezpośrednio wysokość podniesienia warstwownicy, a przy bębnach nawęglających, wózkach rewersyjnych, rękawach wahliwych i innych rozwiązaniach wymaga opracowania sposobu pomiaru),

$v$  – prędkość posuwu rusztu (na przykład na podstawie pomiaru obrotów wału rusztu),

$b$  – szerokość rusztu (wstawiana jako wartość stała),

$\rho_n$  – gęstość nasypowa węgla (wartość wyznaczana, wstawiana do systemu jako stała).

Obsługa dysponując zapisanymi w komputerowym systemie archiwizacji nastawami organów regulacyjnych i wielkościami mierzonymi charakteryzującymi pracę kotła oraz odpowiadających im wartości sprawności może optymalnie prowadzić kocioł. Dodatkową motywacją może być uzależnienie premii uzyskiwanej przez obsługę od osiąganych sprawności zapisanych w systemie archiwizacji. W sposobie tym wysokość warstwy paliwa i prędkość rusztu może być dopasowywana do aktualnej wymaganej wydajności kotła, a ilość powietrza dobierana tak, aby przypadło go stale w przybliżeniu tyle samo na jednostkę paliwa lub po prostu w sposób optymalny wynikający z zapisów archiwalnych. Metoda ta wymaga korekty ze względu na zmiany właściwości paliwa, zabrudzanie się powierzchni i inne.

- d) W oparciu o model matematyczny kotła zawierający szereg uwarunkowań. W takim przypadku sterowanie może się opierać na optymalizacji funkcji

celu zawierającej na przykład oprócz sprawności kotła również minimalizację emisji substancji szkodliwych. Metoda ta, podobnie jak w/w wymaga korekty ze względu na zmiany właściwości paliwa, zabrudzanie się powierzchni i inne.

#### 4. Podsumowanie

Kotły rusztowe spalające węgiel kamienny o wydajnościach od kilkuset kilowatów do kilkudziesięciu megawatów stanowią w dalszym ciągu, mimo coraz większej atrakcyjności paliw gazowych i ciekłych, podstawowe źródła ciepła i pary technologicznej. Węgiel jest atrakcyjny głównie ze względu na niską cenę oraz łatwość magazynowania. Podejmowane są próby współspalania w kotłach rusztowych (po przystosowaniu) również biomasy. W kraju, w setkach kotłowni pracuje duża ilość kotłów rusztowych i nic nie wskazuje na radykalną zmianę istniejącej sytuacji.

Konstrukcja oraz stan techniczny tych kotłów są różne. Bardzo często, zazwyczaj w połączeniu z remontami, prowadzone są modernizacje tych kotłów w zakresie wynikającym z możliwości technicznych i z posiadanych w danym okresie środków. W związku z tym, czasami modernizacja obejmuje pewien fragment instalacji wykonany bez całościowej analizy zachodzących zjawisk. Niekiedy bardzo dobre rozwiązania z jednych kotłowni nie sprawdzają się gdzie indziej ze względu na specyfikę lokalnych warunków lub też nie zawsze mają szansę być zastosowane na innych obiektach ze względu na niewystarczający przepływ informacji.

Powyżej wymieniono niektóre zjawiska towarzyszące napotkanym zmianom w instalacjach powietrza kotłów rusztowych. Ze względu na ich różnorodność trudno jest w sposób ogólny analizować i oceniać poszczególne rozwiązania tym bardziej, że o ostatecznym wyniku oprócz samych cech konstrukcyjnych decyduje szereg czynników, z których najważniejsze to jakość paliwa i sposób prowadzenia kotła. Duża ilość decydujących o końcowym efekcie czynników oraz duża ilość możliwych rozwiązań sprawiają, że wszelkie przedsięwzięcia modernizacyjne wymagają przemyślenia i szczegółowych analiz pozwalających określić wszystkie zjawiska towarzyszące planowanym modernizacjom. Warto też wykonać szczegółowe pomiary eksploatacyjne przed i po przeprowadzeniu modernizacji, gdyż koszt takich badań jest niski w porównaniu z wartością informacji, których dostarczają.

Ponadto warto podkreślić, że spośród poruszanych w powyższym tekście zmian i towarzyszących im zjawisk fakt, że powszechne stosowanie regulacji obrotów wentylatorów daje duże oszczędności, ale w przypadku wentylatorów powietrza podmuchowego przy bezkrytycznym stosowaniu w pewnym zakresie obszaru pracy może prowadzić do nieprawidłowego spalania na ruszcie, ze

względu na małe ciśnienia pod rusztem i małą stromość charakterystyki wentylatora między innymi przy nieodpowiedniej regulacji rozdziału powietrza do stref pod rusztem.

Dodatkowo istotnym dla optymalnej pracy jest sposób prowadzenia kotła. W tym przypadku, dzięki możliwej do określenia na bieżąco sprawności kotła lub ilości wyprodukowanego ciepła z jednostki paliwa oraz mając zapisy archiwalne poszczególnych parametrów, wydaje się słuszne prowadzenie kotła tak, aby uzyskać maksymalny efekt, rezygnując jednocześnie z powszechnie uważanej za najlepszą, metody optymalizacji spalania w oparciu głównie o skład spalin. Jest to tym bardziej słuszne, że archiwizacja bieżącej sprawności kotła lub wydajności osiąganej z jednostki paliwa mogą być elementem służącym do motywowania obsługi kotła.

Mając na uwadze dużą rolę, jaką globalnie odgrywają kotły rusztowe, rozproszenie poszczególnych jednostek oraz różnorodność zadań występujących przy ich konstruowaniu, modernizacjach i eksploatacji warto bardziej wnikliwie analizować zastosowane rozwiązania i upowszechniać te, które najlepiej się sprawdziły.

## Literatura

- [1] Machura K., Wasylów J.: Możliwości obniżenia emisji zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego w kotłach rusztowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl. z. 113, s. 537–544. Gliwice 1990.
- [2] Kapitaniak A., Sztraube J.: Poradnik palacza. Budowa i obsługa grzewczych i przemysłowych kotłów rusztowych WNT W-wa 1991.
- [3] Orłowski P.: Kotły parowe. Konstrukcje i obliczenia. WNT Warszawa 1966.
- [4] Kruczek St.: Kotły. Konstrukcje i obliczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2001.
- [5] Górzynski J.: Audyting energetyczny obiektów przemysłowych. Fundacja Poszanowania Energii. Warszawa 1995.
- [6] Parys R.: Czy modernizacje kotłów WR-25-014(13) dały spodziewane efekty? Gospodarka Paliwami i Energią nr 7/2003 str. 17–21.
- [7] Parys R.: Eksploatacyjne pomiary cieplne kotła WRm-12 zainstalowanego w EC „Anna” w Pszowie.. Opracowanie BUTiH EKOKAL Kalety nr ewid. P-81/2002, październik 2002 r. (niepublikowane).
- [8] Parys R.: Pomiary eksploatacyjne kotła WR-25-014S zainstalowanego w Ciepłowni Zawodzie Zakładu Energetycznego Częstochowa SA. Opracowanie BUTiH EKOKAL Kalety nr ewid. P-87/2003, luty 2003 r. (niepublikowane)
- [9] Czekalski B., Drózd W.: Sprawozdanie z badań energetycznych i emisji zmodernizowanego kotła typu WR-25 NR 4 zainstalowanego w Elektro-



- ciepłowni OPEC Grudziądz Sp. z o.o. w Grudziądzu, opracowanie Przedsiębiorstwa EN-POL s.c. Sosnowiec, listopad 2000 r. (niepublikowane).
- [10] Parys R.: Wykonanie pomiarów charakterystyk wentylatorów powietrza przy kotle VRF – 800 w Fabryce SKLEJKA – PISZ SA. Opracowanie BUTiH EKOKAL Kalety nr ewid. P-107/2004, marzec 2004 r. (niepublikowane).
- [11] Parys R.: Pomiary energetyczno-sprawnościowe dwóch kotłów WR 25 zainstalowanych w ciepłowni Zakładu Energetyki Ciepłej Sp. z o. o. w Wołominie przy ul. Szosa Jadowska 49. Opracowanie BUTiH EKOKAL Kalety nr ewid. P-130/2006, styczeń 2006 r. (niepublikowane).
- [12] Szlęk A., Wilk R.: Perspektywy użytkowania kotłów rusztowych w Polsce. V Ogólnopolska Konferencja „Problematyka techniczna, ekonomiczna i własnościowa ciepłownictwa w Polsce. Korbielów 30.11÷3.12.1998 r.
- [13] Parys R.: Pomiary eksploatacyjne kotła WR-25-014S zainstalowanego w Ciepłowni Zawodzie Zakładu Energetycznego Częstochowa SA. Opracowanie INTROL-OPOLE nr ewid. 82/2000, kwiecień 2000 r. (niepublikowane).
- [14] Parys R. Pomiary eksploatacyjne i diagnostyka w procesie modernizacji oraz optymalizacji pracy kotłów rusztowych Materiały Konferencyjne zeszyt 1, str. 93–100, Konferencja N-T Modernizacja Kotłów Rusztowych. Szczyrk 1997 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej WITKOWSKI

Wpłynęło do Redakcji 18.08.2006 r.