

Marek PRNOBIS

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 20, 44-100 Gliwice

pronobis@kotly.w.pl

WYBRANE PROBLEMY BADAWCZE W TECHNICIE KOTŁOWEJ

***Streszczenie.** W pracy omówiono zasadnicze problemy, wyznaczające kierunki badań we współczesnej technice kotłowej. Na tym tle opisano najważniejsze badania prowadzone w Zakładzie Kotłów i Wytwornic Pary Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w ostatnich latach.*

SELECTED INVESTIGATION ISSUES IN BOILER TECHNOLOGY

***Summary.** The paper presents main problems of boiler technology on which the investigation efforts are focused. Against the background of such review the latest investigations carried out in the Division of Boilers and Steam Generators of the Institute of Power Engineering and Turbomachinery are described.*

1. Wprowadzenie

Rozwój techniki kotłowej jest skorelowany ze zmieniającymi się warunkami zewnętrznymi działania energetyki, jakimi są:

- konieczność spalania znacznie szerszej niż dotąd gamy paliw,
- spodziewane dalsze zaostrzenie norm ochrony środowiska,
- konieczność sprostania silnej konkurencji zagranicznych dostawców energii elektrycznej.

W dziedzinie kotłów energetycznych wyzwania te wiążą się z wieloma przedsięwzięciami, z których najistotniejsze to:

- poprawa sprawności,
- obniżenie emisji substancji szkodliwych,
- przystosowanie palenisk do głębokich zmian paliwa,
- obniżenie zużycia energii na potrzeby własne,
- obniżenie kosztów eksploatacji i remontów.

Zagadnienia te są również przedmiotem zainteresowania pracowników Zakładu Kotłów i Wytwornic Pary (ZKiWP) Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, którzy w ostatnich latach wykonali szereg prac badawczych, ważnych zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia. Celem większości z nich było

dostarczenie rozwiązań przydatnych do modernizacji kotłów zbudowanych w ostatnim ćwierćwieczu XX w., które jeszcze przez co najmniej kilkanaście lat będą stanowiły podstawę krajowej energetyki. Niektóre z tych rozwiązań zostały już wdrożone, przynosząc znaczne efekty ekonomiczne.

2. Poprawa sprawności kotła

We współczesnych kotłach energetycznych największy wpływ na sprawność ma strata wylotowa. Większość krajowych kotłów została zaprojektowana i zbudowana przed zmianą ustroju, w warunkach relatywnie niskich cen paliw w stosunku do cen materiałów konstrukcyjnych. W takiej sytuacji brak było motywacji do przyjmowania niskich temperatur spalin wylotowych (t_{sw}) w celu osiągnięcia wysokiej sprawności kotła. W rezultacie w zdecydowanej większości pracujących w kraju kotłów temperatura spalin wylotowych jest zawyżona, co powoduje duże straty ekonomiczne. Dość częstym mankamentem są nadmierne przysuszenia i przecieki powietrza do spalin, również istotnie obniżające sprawność.

Poprawa jakości spalanych węgla oraz powszechne zastosowanie niskoemisyjnych technik spalania stały się pośrednią przyczyną obniżenia się kwasowego punktu rosy spalin w kotłach pyłowych [1 ÷ 3]. Wyniki badań dowodzą, że w kotłach z niskoemisyjnym paleniskiem jest on niewiele wyższy od wodnego punktu rosy, przez co znacznie maleje zagrożenie korozyjne elementów ciągu spalinowego, dając możliwość obniżenia t_{sw} w stosunku do wartości spotykanych aktualnie.

Obniżenie temperatury spalin wylotowych można uzyskać za pomocą następujących przedsięwzięć:

- rozbudowa (lub przebudowa) konwekcyjnych powierzchni ciśnieniowych,
- rozbudowa (lub przebudowa) podgrzewacza powietrza,
- zastosowanie (lub modyfikacja istniejącego) systemu oczyszczania powierzchni ogrzewalnych z zanieczyszczeń popiołowych,
- optymalizacja temperatury powietrza na dopływie do podgrzewacza.

Spośród zmian konstrukcyjnych prowadzących do obniżenia t_{sw} największy efekt daje rozbudowa końcowych powierzchni ogrzewalnych kotła, które stanowią najczęściej podgrzewacz powietrza i początkowy stopień podgrzewacza wody.

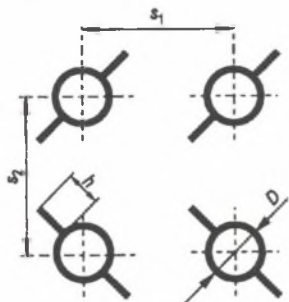
2.1. Rozbudowa powierzchni ciśnieniowych

W większości przypadków sposoby obniżenia wartości t_{sw} poprzez zwiększenie ilości ciepła przejmowanego w powierzchniach konwekcyjnych sprowadzają się do rozbudowy lub przebudowy podgrzewacza wody, który jest ostatnią wzdłuż drogi spalin powierzchnią ciśnieniową kotła.

Podgrzewacze wody w kotłach energetycznych mają na ogół postać korytarzowych lub przestawnych pęczków rur gładkich. Podczas modernizacji istniejącego kotła rzadko możliwe jest istotne zwiększenie powierzchni ogrzewalnej podgrzewacza przy zachowaniu istniejącego układu pęczka, bez ingerencji w rozmiary kanału spalinowego. Dlatego coraz częściej w takich modernizacjach stosowane są układy ozebrowane.

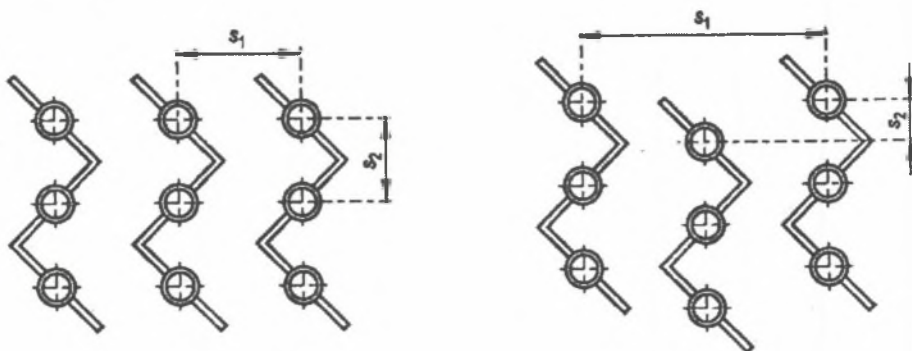
W ZKiWP opracowano kilka nowych rozwiązań powierzchni tego rodzaju. Pierwsze prace dotyczyły, obecnie już klasycznych, pęczków membranowych i opłétwowanych z żebrami skierowanymi zgodnie z kierunkiem przepływu spalin. Zbadano współczynniki wnikania ciepła i liczby oporu [4, 5] oraz skłonność powierzchni do ulegania zanieczyszczeniu popiołem lotnym. Praktycznym rezultatem tych prac były wdrożenia, w postaci modernizacji 4 kotłów rusztowych EC Powiśle oraz kotła WP 120 w EC Tychy. Doskonałe rezultaty spowodowały, że po rozwiązaniu tego typu konstruktorzy sięgają coraz chętniej, a liczba praktycznych realizacji stale rośnie.

Nowatorskim pomysłem były pęczki opłétwowane z żebrami skierowanymi pod kątem do kierunku przepływu spalin (pęczki diagonalne) [6] - rys. 1.



Rys. 1. Schemat pęczka diagonalnego
Fig. 1. Diagonal tube bank

Diagonalne pęczki membranowe [7] pokazane na rys. 2 stanowią modyfikację konwencjonalnych wymienników ciepła z rur membranowych, w których żebra wzdłużne są umieszczone równoległe do kierunku napływu czynnika.

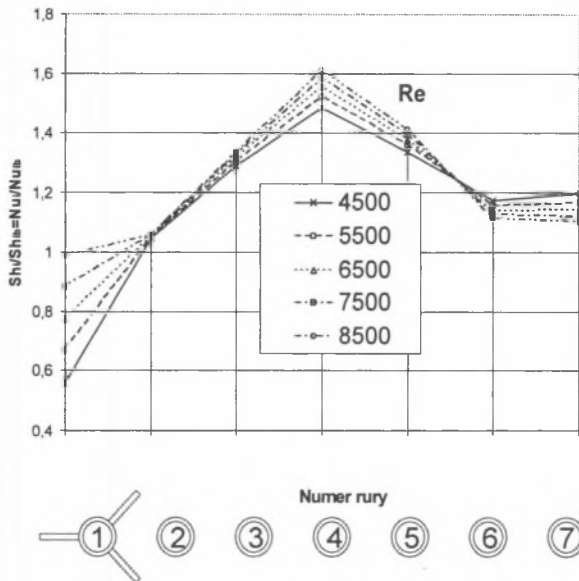


Rys. 2. Diagonalne pęczki membranowe (korytarzowy i przestawny)
Fig. 2. In-line and staggered diagonal membrane tube banks

Wymienniki tego rodzaju górują nad typowymi układami z rur nieożebrowanych (gładkich) powierzchnią wymiany ciepła, dorównując im wielkością współczynnika wnikania ciepła oraz charakteryzują się mniejszą skłonnością do ulegania zanieczyszczeniu w przypadku omywania czynnikiem zapyłonym. Nad klasycznymi pęczkami membranowymi nowe pęczki górują wielkością współczynnika wnikania ciepła oraz mniejszą skłonnością do powstawania osadów popiołowych.

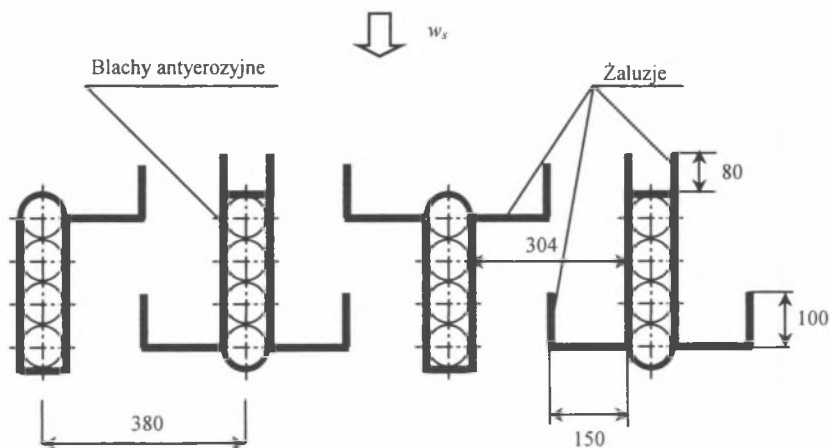
Niedawno opracowano rury opłétwowane nowego typu - są to tzw. rury trójżebrowe [8]. Można z nich wykonywać typowe pęczki, bądź też stosować pojedyncze rzędy rur tego rodzaju jako turbulizatory zwiększające współczynnik wnikania ciepła w położonych z nimi układach rur gładkich - rys. 3.

Nowatorskie rozwiązanie stanowią pęczki żaluzjowe - rys. 4, charakteryzujące się tym, że umieszczone na rurach żebra wzdłużne są specjalnie ukształtowane i tak usytuowane, aby wymusić silne zawirowanie czynnika przy przepływie przez pęczek, w wyniku czego nie tylko ulega intensyfikacji wnikiwanie ciepła do rur, lecz także następuje częściowe odpylenie czynnika [9]. Dodatkową zaletą takiego układu jest możliwość umieszczenia go w strefie wysokich temperatur, np. na wylocie z komory paleniskowej kotła pyłowego, ponieważ intensywny odbiór ciepła chroni elementy odpylające przed uszkodzeniem termicznym. Pierwszy układ tego rodzaju został zbudowany w kotle OPF 230 w Centrum Energetyki Zakładów Azotowych w Tarnowie. Uzyskano nawrót grubych frakcji popiołu lotnego do paleniska, co dało w efekcie kilkakrotne zmniejszenie zawartości substancji palnych w popiele z elektrofiltra.



Rys. 3. Przebieg zmian stosunku $Sh_i / S_{ib} = Nu_i / Nu_{ib}$ wzdłuż drogi przepływu strugi, dla pęczka zmodyfikowanego i bazowego (z samych rur gładkich), przy $Re = 4500 - 8500$

Fig. 3. Relationship of ΔSh versus tube number in investigated column for Re numbers 4500 - 8500



Rys. 4. Przekrój pęczka żaluzjowego

Fig. 4. Cross-section of heat exchanging dust separator

Skomplikowana struktura przepływów spalin w powierzchniach konwekcyjnych wielkich kotłów energetycznych sprawia, że problem ich modelowania jest niezwykle ważny. W ZKiWP opracowano nowy sposób modelowania fizycznego, pozwalający wyznaczyć lokalne rozkłady intensywności wnikania ciepła przy wykorzystaniu metody analogii naftalenowej [10].

2.2. Rozbudowa lub przebudowa podgrzewacza powietrza

Najłatwiejszym sposobem obniżenia temperatury spalin wylotowych jest zwiększenie ilości ciepła odebranego w podgrzewaczu powietrza. Spalinowe podgrzewacze powietrza w kotłach energetycznych budowane są głównie jako regeneracyjne obrotowe (ROPP) i podgrzewacze rurowe. Obecnie na świecie zaczynają się pojawiać podgrzewacze z rur ciepłych.

W ZKiWP prowadzono prace, których rezultatem było opracowanie nowych wypełnień ROPP [11] oraz podanie zasad optymalnego projektowania podgrzewaczy powietrza typu rekuperacyjnego z wykorzystaniem intensyfikacji wymiany ciepła wewnątrz rur [12, 13]. Zaprojektowano także wstępne parowe podgrzewacze powietrza z rur bimetalicznych, tzn. z ożebrowaniem spiralnym walcowanym z aluminium na wewnętrznej rurze stalowej. Wymienniki ciepła tej konstrukcji są obecnie powszechnie stosowane w energetyce.

2.3. Zastosowanie systemu oczyszczania powierzchni z osadów popiołu

W kotłach, których spaliny zawierają popiół lotny, następuje zanieczyszczenie powierzchni konwekcyjnych prowadzące do pogorszenia ekonomiczności pracy urządzenia. Powstanie osadów powoduje:

- obniżenie sprawności kotła na skutek wzrostu temperatury spalin wylotowych,
- obniżenie sprawności bloku energetycznego na skutek spadku temperatur pary poniżej wartości nominalnych,

- obniżenie sprawności odpylania w elektrofiltrze w wyniku wzrostu temperatury i strumienia objętościowego spalin na dolocie,
- wzrost zużycia energii na przetłaczanie spalin przez kocioł.

Badania zjawisk powstawania osadów na powierzchniach ogrzewalnych kotłów jest od wielu lat przedmiotem zainteresowania ZKiWP. Opracowano w tym zakresie nowe metody badawcze i obliczeniowe [3]. Ostatnio przedmiotem badań było określenie szybkości narastania osadów, istotne ze względu na konieczność optymalizacji cykli zdmuchiwania powierzchni [14]. Po raz pierwszy stworzono formułę do obliczania czasu osiągnięcia maksymalnej wielkości osadów

$$\tau_{os} = 9,01 \cdot \sigma_2^{-1,723} \cdot w_{sp}^{0,744} \left(\frac{R_{0,03}}{24,5} \right)^{0,319} \left(\frac{T_{sp}^{sr}}{373} \right)^{0,249} \quad [\text{h}],$$

gdzie: $\sigma_2 = s_2 / D$ - względna podziałka wzdłużna rur,

$R_{0,03}$ - udział ziaren popiołu lotnego większych od 30 μm , %,

w_{sp} - prędkość spalin, m/s,

T_{sp}^{sr} - średnia temperatura spalin w obrębie pęczka, K.

ujmującą wpływ właściwości spalin i popiołu lotnego oraz cechy geometryczne pęczka. Oprócz prac dążących do ograniczenia strat wylotowej w ZKiWP prowadzone są także badania w celu ograniczenia pozostałych strat cieplnych kotła, w tym paleniskowej [15, 16].

3. Obniżenie emisji substancji szkodliwych

Spełnienie norm emisji tlenków azotu praktycznie zawsze wymaga przebudowy układu paleniskowego. Fakt ten spowodował, że w energetyce po roku 1990 trwały intensywne prace modernizacyjne. W niektórych przypadkach zdecydowano się nawet na przystosowanie kotłów pyłowych do spalania gazu ziemnego lub oleju opałowego.

W kotłach pyłowych na szerszą skalę stosowano następujące systemy [3]:

- stopniowanie powietrza przy zastosowaniu pionowej (OFA) i/lub poziomej (LNCFS, PSP) separacji powietrza,
- palniki niskoemisyjne,
- stopniowanie paliwa i powietrza przy wykorzystaniu zróżnicowania koncentracji mieszaniny paliwowo-powietrznej na różnych poziomach palników zarówno narożnych, jak i naściennych,
- paleniska z wirem niskotemperaturowym.

W zasadzie we wszystkich przypadkach, po krótszym lub dłuższym okresie opanowywania technologii, uzyskano zadowalające rezultaty w zakresie emisji, w związku z czym można uznać, że na obowiązującym obecnie poziomie ograniczeń przy spalaniu pyłu węglowego problem od strony technicznej został rozwiązany. Pojawiły się natomiast inne istotne problemy eksploatacyjne, chociażby w dziedzinie zapewnienia odpowiedniej trwałości rur ekranów komór paleniskowych. W tej dziedzinie w ZKiWP prowadzono liczne prace badawcze, których efektem jest opracowanie nowych metod ochrony ekranów przed korozją wysokotemperaturową [17 ÷ 19].

Praktycznie w każdym kotle wprowadzenie spalania niskoemisyjnego pociągnęło za sobą konieczność modernizacji układu młynowo-paleniskowego dla poprawy jakości przemiału oraz wydajności i dynamiki młynów. ZKiWP dysponuje modelowym układem młynowym, na którym prowadzone są badania przemiału węgla i innych minerałów oraz przepływów dwufazowych w rurociągach pyłowych i palnikach [20, 21]. Wykonywano także badania wpływu cech konstrukcyjnych młyna na jego wydajność i granulację produkowanego pyłu.

W ZKiWP prowadzone są także badania procesu wysokotemperaturowego odsiarczania spalin [22, 23].

4. Przystosowanie kotłów do zmian paliwa

Występujące w krajach Europy Środkowej zmiany cen paliw i materiałów konstrukcyjnych związane z wprowadzeniem gospodarki rynkowej oraz narzucenie zaostrożonych norm ochrony środowiska powodują, że coraz częściej pojawia się zapotrzebowanie na modernizacje dla umożliwienia spalania innego paliwa, niż to, na które kocioł był zaprojektowany.

Potrzeba termicznego unieszkodliwiania odpadów oraz nacisk na spalanie paliw regenerowalnych w celu obniżenia emisji CO₂ stały się powodem coraz częstszego współspalania tego typu materiałów z węglem w kotłach energetycznych. Ze względu na swoje organiczne pochodzenie paliwa te (np. drewno, kora, osady ściekowe, odpady komunalne itp.) określane są ogólnym terminem „biomasa”, aczkolwiek w ich skład wchodzi nie tylko składniki ściśle naturalne, lecz także np. tworzywa sztuczne. Udział paliwa dodatkowego w stosunku do podstawowego, którym z reguły jest węgiel kamienny, bywa różny i zależy głównie od dostępnej ilości biomasy oraz technicznych możliwości jej spalania przy jednoczesnym spełnieniu wymagań w zakresie emisji szkodliwych substancji. Wprowadzenie do kotła paliwa o charakterystyce skrajnie nieraz różnej od zakładanej podczas projektowania może jednak spowodować rozmaite, na ogół negatywne, zjawiska, które nie tylko utrudnią eksploatację, ale czasem mogą współspalanie pewnych paliw uczynić nieopłacalnym. W ZKiWP prowadzone są prace dla oceny wpływu dodatkowego spalania różnych form biomasy na skłonność popiołu lotnego do tworzenia osadów na powierzchniach konwekcyjnych a w konsekwencji na sprawność kotła, a także na procesy zużłowania i korozji [24, 25].

5. Zmniejszenie zużycia energii na potrzeby własne oraz obniżenie kosztów eksploatacji i remontów

Poszukiwanie oszczędności energii oraz dążenie do zwiększenia trwałości kotłów i ich urządzeń pomocniczych jest ważną dziedziną prac Instytutu. Opracowano np. rozwiązania, które w układach młynowych z nadciśnieniem pozwalają uniknąć przetłaczania gorącego powietrza przez wentylatory [3, 26]. Stworzono także, wdrożone w praktyce, zasady optymalizacji cykli oczyszczania powierzchni ogrzewalnych za pomocą zdmuchiawczy parowych [3], umożliwiające ograniczenie kosztów procesu i zmniejszenie erozji rur.

Ważnym kierunkiem były badania mające na celu ograniczenie erozji popiołowej powierzchni konwekcyjnych kotłów [3, 27]. Wiele prac dotyczyło poprawy działania

układów młynowych, przyczyniając się do wydłużenia okresów międzyremontowych i zmniejszenia zużycia energii na przemiał i wentylację [28].

W wyniku wdrożenia prac ZKiWP nad poprawą rozkładu obciążeń cieplnych przegrzewaczy pary uzyskano przedłużenie trwałości rur w kilku elektrowniach [29, 30].

Bibliografia

1. Pronobis M., Czepelak J., Gramatyka Fr., Kalisz S., Mroczek K.: Badania kwasowego punktu rosy spalin w kotłach pyłowych. VIII Konferencja Kotłowa'98 „Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów”. Pol. Śląska, Inst. Maszyn i Urządzeń Energet. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z.2, t. 2. Gliwice 1998
2. Wąsik J., Błaszczuk A.: Wpływ parametrów spalin za kotłem na skuteczność odpylania elektrofiltrów. Materiały Seminarium: Doświadczenia i perspektywy modernizacji kotłów energetycznych dla obniżenia emisji NO_x- technologie, automatyka procesu spalania. Szczyrk, 1997
3. Pronobis M.: Modernizacja kotłów energetycznych. WNT, Warszawa 2002
4. Pronobis M.: Wymiana ciepła w zanieczyszczonych powierzchniach konwekcyjnych kotłów. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, s.: Energetyka, z. 115, Gliwice 1992
5. Madejski S., Gramatyka F., Pronobis M.: Zanieczyszczenia konwekcyjnych powierzchni ożebrowanych w kotłach pyłowych. XVII Zjazd Termodynamików, Politechnika Krakowska - Kraków 1999
6. Czepelak J., Gaiński J., Pronobis M.: Modelluntersuchungen des Wärmeaustausches und Strömungswiderstandes an den Heizflächen mit Diagonalflossen. Heat and Mass Transfer, 7, 1996
7. Pronobis M., Kalisz S., Wejkowski R.: Model investigations of convective heat transfer and pressure loss in diagonal membrane heating surfaces. Heat and Mass Transfer 38 (2002) s. 343-350.
8. Wejkowski R., Pronobis M.: Badania możliwości wykorzystania rur trójżebrowych w części konwekcyjnej kotłów. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
9. Pronobis M., Kalisz S., Wejkowski R.: Opracowanie dokumentacji odpylacza żaluzjowego kotła pyłowo-fluidalnego OPF-230 w Centrum Energetyki Zakładów Azotowych w Tarnowie Mościcach SA. Gliwice 2002 (niepublikowane).
10. Kalisz S., Pronobis M.: Wpływ nierównomierności rozkładu prędkości spalin na wymianę ciepła w powierzchniach konwekcyjnych kotła. Materiały IX Konferencji Kotłowej Szczyrk 2002. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
11. Baran M., Walewski A., Wojnar W., Pękała S: Badania doświadczalne ceramicznych elementów grzewczych regeneracyjnych obrotowych podgrzewaczy powietrza. Gospodarka Paliwami i Energią 1/1983
12. Pronobis M.: A Comparison of Methods to Improve the Heat Transfer at the Inner Walls of Tubes, VGB Kraftwerkstechnik 74, No.2, 1994
13. Pronobis M., Wejkowski R.: Wpływ konstrukcji rurowego podgrzewacza powietrza na dopuszczalną temperaturę spalin wylotowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Energetyka z. 131, Gliwice 1999

14. Kalisz S., Pronobis M.: Badania szybkości narastania osadów popiołowych na powierzchniach konwekcyjnych kotłów. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
15. Rataj Z. L.: Rola i znaczenie pomiaru zawartości części palnych w popiele lotnym w trybie on-line dla optymalizacji eksploatacji kotłów i jakości wytwarzanego półproduktu. Materiały VIII Konferencji Kotłowej'98. Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace naukowe. Monografie. Konferencje, z.2, Gliwice 1998
16. Rataj Z. L.: Walewski A.: Mroczek K., Wojnar W.: Optymalizacja spalania w kotle z paleniskiem pyłowym z pośrednim zasobnikiem pyłu. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
17. Pronobis M., Kalisz S., Ostrowski P., Wejkowski R.: Untersuchungen der Hochtemperaturkorrosion in den Dampferzeugern mit NO_x - armer Verbrennung. International Scientific Conference, Kosice 2002
18. Pronobis M., Gębala S., Wrona J.: Badania składu spalin w obszarze przyściennym palenisk kotłów elektrowni Jaworzno III. Sympozjum „Sposób zmniejszenia wysokotemperaturowej korozji ekranów”. Jaworzno 2003
19. Krupa M., Kosałka J.: Modyfikacja składu spalin w komorze paleniskowej poprzez zmianę rozkładu strumieni paliwa wyprowadzonego z młynów. Sympozjum „Sposób zmniejszenia wysokotemperaturowej korozji ekranów”. Jaworzno 2003
20. Mroczek K., Pronobis M., Wala T.: Porównanie metod obliczeń spadków ciśnienia w instalacjach pyłowych kotłów. Arch. Energetyki t. XXX (2001), nr 1-2, 107-121.
21. Czepelak J., Mroczek K., Wala T.: Badania modelowe pyłowych palników niskoemisyjnych. Materiały VIII Konferencji Kotłowej'98. Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace naukowe. Monografie. Konferencje, z.2. Gliwice 1998
22. Pronobis M.: Wpływ wysokotemperaturowego odsiarczania spalin na pracę kotła. Archiwum Energetyki - w druku.
23. Gramatyka F.: Odsiarczanie spalin w kotłach przemysłowych z paleniskiem rusztowym. VIII Wiosenne Spotkanie Ciepłowników z SEFAKO S.A. nt. „Kotły opalane miałem węglowym nowej generacji”. Bocheniec Sędziszów, maj 2002
24. Pronobis M.: Wpływ współspalania biomasy na zużłowanie paleniska kotła. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
25. Pronobis M.: Wpływ paliw dodatkowych na zanieczyszczenie i sprawność kotła. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002
26. Krupa M., Pronobis M.: Nowoczesne układy powietrza pierwotnego stosowane w energetyce. Sympozjum PKE listopad 2001
27. Pronobis M., Pronobis A.: The diagnostic code for calculating the influence of boiler's operating parameters on the erosion of convection surfaces. International Scientific Conference “Combustion and Environment” Ostrava 2003
28. Krupa M.: Modernizacje instalacji młynowych kotłów w elektrowniach PKE - cele i uzyskane wyniki eksploatacyjne. Materiały IV Konferencji na temat „Budowa

- i eksploatacja młynów węglowych oraz palenisk rusztowych stosowanych w energetyce i ciepłownictwie”. Ustroń, październik 2003
29. Cwynar L.: Rozruch kotłów parowych. WNT, Warszawa 1989
 30. Pronobis M., Wojnar W., Czepelak J.: Wpływ nierównomiernego ogrzewania na naprężenia w rurach przegrzewacza grodziowego. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002