ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986

Seria: ENERGETYKA z. 94 Nr kol. 880

Jakub Franciszek KURAŚ

Raciborska Fabryka Kotłów "RAFAKO" w Raciborzu

PROJEKTY KOTŁÓW ENERGETYCZNYCH RAFAKO NA TLE TENDENCJI ŚWIATOWYCH

Streszczenie: Opisano zakres projektowania RAFAKO oraz pochodzenie metod projektowych stosowanych w RAFAKO. Omówiono jakie typy kotłów zostały zaprojektowane i na jakie paliwo.
Opisano stosowane obiegi czynnika w projektowanych kotłach, wskazano na czynniki uwarunkowujące stosowanie tych obiegów. Omówiono rodzaje współpracy kotła z turbiną, z podkreśleniem pracy bloku na ciśnieniu poślizgowym. Omówiono cechy stosowanych sylwetek kotłowych oraz stosowane rozwiązania konstrukcyjne. Zostały wyspecyfikowane podstawowe problemy projektowe.
Opisano stosowane typy palenisk, stosowane rozwiązania specjalne w kotłach parowych. Przedstawiono problemy związane z ochroną środowiska oraz wymieniono tendencje rozwojowe w budowie kotłów.

1. Wstęp

Zrealizowane projekty kotłów energetycznych Rafako, są dobrze znane użytkownikom zarówno polskich jak i wielu innych elektrowni na świecie. Dorobek Rafako został też szerzej omówiony w periodykach technicznych [1] oraz okolicznościowych wydawnictwach wewnętrznych. W niniejszym opracowaniu zostaną omówione obszary działalności Rafako na tle działalności innych światowych firm, w aspekcie stosowanych rozwiązań zarówno szczegółowych, jak i tych, które określamy synonimem tendencji światowych.

2. Zakres projektowania RAFAKO

Rafako jest projektantem kotłów parowych, w zakresie od koncepcji do dokumentacji warsztatowej. Projekt kotła jest wykonywany w oparciu o metody obliczeniowe wywodzące się od uznanych firm światowych /powiązania licencyjne/ uzupełnione dorobkiem krajowym i własnym, za pomocą techniki komputerowej. Dotyczy to zwłaszcza takich obliczeń jak cieplne, wytrzymałościowe, statyczne, rozruchowe itp. Do tych obliczeń kotłowych wykorzystano materiały zawarte w takich opracowaniach, jak " NORMATIVNE METOD", obliczenia cieplne stosowane przez firmę SULZER mającą ścisłe powiązania z firmą COMBUSTION ENGINEERING USA, następnie materiały pochodzące od firmy EVT Stuttgart oraz S.R.M. Sztokholm.
Ze źródeł krajowych należy wymienić opracowania ITC Łódź, JE Warszawa, CBKK Tarnowskie Góry oraz opracowania Politechniki Gliwickiej, Warszawskiej oraz Wrocławskiej.

3. Paliwa energetyczne

Do liczących się paliw energetycznych na świecie należą węgle kamienne i brunatne, oraz oleje opałowe i gazy ziemne.
Do paliw uzupełniających zaliczyć można, oprócz bardzo szerokiego lecz rzadko stosowanego asortymentu różnych odpadów, paliwa takie jak gaz wielkopiecowy oraz gaz koksowniczy.
Jakkolwiek Rafako projektowało kotły na niemal wszystkie podstawowe paliwa, to jednak największe doświadczenie reprezentuje w zakresie węgli brunatnych i kamiennych.
Zwłaszcza w dziedzinie węgli brunatnych projekty wykonane przez Rafako, oraz zbudowane na bazie tych projektów kotły reprezentują poziom światowy. Chodzi tu zarówno o wielkość zbudowanych jednostek, jak np. kocioł BB-1880 przeznaczony do współpracy z blokiem 600 MW jak i różnorodności stosowanych rozwiązań.
W dziedzinie węgli kamiennych Rafako posiada nie mniejsze doświadczenia, zwłaszcza w projektowaniu kotłów na węgle mocno zapopielone. W swoich rozwiązaniach Rafako stosuje paleniska z bezpośrednim wdmuchiwaniem pyłu do komory paleniskowej jak i też z pośrednim bunkrowaniem. Większość projektów zostało wykonanych na węgle kamienne o niskiej wartości opałowej rzędu 15000 - 20000 kJ/kg, mniej na węgle lepsze rzędu 20000 - - 25000 kJ/kg, na węgle kamienne o wartości opałowej większej od 25000 kJ/kg projektów nie robiono z tego względu, że takie węgle nie są spalane w kraju.
W dziedzinie olejów opałowych w Rafako zostały zaprojektowane i zbudowane dwa typy kotłów, kocioł typu jednociągowego OO-420 dla Rafinerii Płockiej oraz kocioł dwuciągowy o zwartej sylwetce typu box dla Elany Toruń i Linoperamaty Grecja. Były też zbudowane w Rafako kotły o wydajności 220 t/h pary, opalane węglem kamiennym oraz olejem, a przeznaczone dla Indii.
Na gaz ziemny Rafako kotłów nie projektowało. Zostały jedynie zaprojektowane w Rafako i zbudowane kotły o wydajności do 260 t/h pary opalane węglem kamiennym oraz gazem wielkopiecowym i koksowym.
W podsumowaniu można więc powiedzieć, że domeną projektową Rafako są węgle brunatne i kamienne, kotły na paliwa płynne i gazowe stanową margines produkcji.

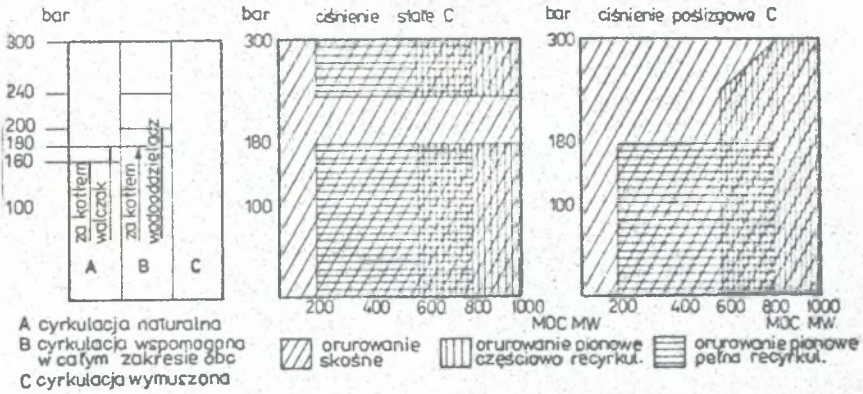
4. Stosowane obiegi

Kotły parowe opalane paliwami kopalnianymi są budowane z następującymi obiegami w parowniku:

4.1. Cyrkulacja naturalna

Jest najprostszym sposobem zapewnienia obiegu czynnika w parowniku, elementem ograniczającym jej stosowanie jest poziom ciśnienia. Ze względu na wysokość ciśnienia, uznaje się w literaturze światowej ciśnienie 160 barów na wylocie z kotła a 180 barów w walczaku jako górną granicę

stosowalności cyrkulacji naturalnej. Rys. 1 [2,3]

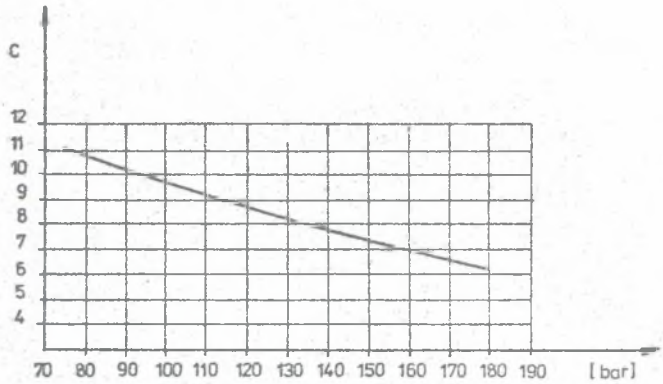


Rys. 1

Zakresy stosowanych ciśnień w różnych typach cyrkulacji i orurowań komór paleniskowych kotłów parowych w funkcji ciśnienia i mocy bloków

Range of applied pressures in different types of circulation and water - wall construction of the steam boilers vs pressure and power unit ratings.

W granicach tych też mieszczą się wszystkie kotły zaprojektowane przez Rafako. Istnieją dwa ograniczenia stosowania cyrkulacji naturalnej. Jednym z nich jest zdolność skutecznej separacji pary od wody, która to zdolność maleje wraz ze wzrostem ciśnienia, przy jednoczesnym wzroście rozpuszczalności krzemionki w parze, drugim jest spadek krotności cyrkulacji wraz ze wzrostem ciśnienia (Rys. 2), która może doprowadzić do uszkodzenia ekranów parownika na skutek wystąpienia miejscowego odparowania. Uwzględniając wszystkie aspekty przepływowe i konstrukcyjne w kotłach z naturalną cyrkulacją utrwaliły swoją pozycję ściany szczelne zbudowane z rur ø 51 lub 57 w podziałce 75 mm. W zakresie stosowanych urządzeń separacyjnych w walczaku, stosowano w Rafako całą gamę różnego typu urządzeń, to znaczy trójstopniowy system odsalania perforowane płuczki wodne, zawirowywacze cyklonowe, żaluzje oraz demisitery budowane w układzie poziomym i pionowym. W miarę polepszania się jakości wody zasilającej jaką dysponowały elektrownie, jako standardowe wyposażenie walczaków kotłów z naturalną cyrkulacją stosuje się obecnie urządzenia cyklonowe oraz żaluzje.



Rys. 2

Krotność cyrkulacji przebadanego kotła 50 MW opalanego węglem kamiennym w funkcji ciśnienia w walczaku

Circulation ratio of 50 MW bituminous coal fired boiler vs drum pressure

4.2. Cyrkulacja wspomagana

Chęć uzyskania wyższej sprawności cieplnej obiegu wymagała zastosowania wyższych ciśnień pary, natomiast powszechne stosowanie ścian szczelnych zwłaszcza w dużych kotłach wprowadziło dosyć skomplikowany układ przepływowy parownika, zwłaszcza przy zabudowaniu w komorze paleniskowej ekranu dwustronnie opromieniowanego. Te czynniki spowodowały konieczność wzmocnienia naturalnej cyrkulacji. Problem ten został rozwiązany poprzez zabudowanie w układzie cyrkulacji naturalnej pomp wspomagających tę cyrkulację. W Rafako został zaprojektowany i zbudowany kocioł AP-1650 dla współpracy z blokiem 500 MW w el. Kozienice, w którym zastosowano cyrkulację wspomaganą. W kotle zabudowano 4 pompy cyrkulacyjne. Kotły tego typu są dość często stosowane na świecie, w eksploatacji wykazały duży stopień niezawodności. Jedynym mankamentem obiegu jest występowanie nierównego poziomu wody w walczaku, w zależności od ilości pracujących pomp cyrkulacyjnych. Równy poziom wody w walczaku zapewnia jedynie praca wszystkich czterech pomp cyrkulacyjnych pomimo tego, że do pełnej wydajności kotła wystarcza praca 3 pomp i tyle też pomp pracuje przy pełnej wydajności kotła. Dla tego typu obiegu cyrkulacyjnego ograniczeniem wzrostu ciśnienia jest z jednej strony utrudniona separacja pary i wody w walczaku, z drugiej strony pogarszające się warunki pracy pompy cyrkulacyjnej w miarę zbliżania się do ciśnienia krytycznego, ze względu na szybkie zmiany gęstości czynnika w rejonie ciśnie-

nia krytycznego. Kotły walczakowe ze wspomaganą cyrkulacją pracują z ciśnieniem stałym za kotłem. Jako ciśnienie graniczne za kotłem przyjmie się wartość 180 barów.

4.3. Cyrkulacja wymuszona

Ten typ przepływu czynnika przez parownik stosuje się w kotłach bezwalczakowych w dwóch różnych rozwiązaniach:

a/ z cyrkulacją,

b/ z przepływem jednokrotnym.

W wypadku kotłów z cyrkulacją w parowniku realizowaną za pomocą tego samego typu pomp jak w układach z cyrkulacją wspomaganą, stosuje się w parowniku układ rur pionowych, w przypadku b/ w zależności od mocy bloku może zaistnieć potrzeba zastosowania orurowania pionowego względnie skośnego.

W przypadku b/ przy częściowych obciążeniach dla zapewnienia odpowiedniego chłodzenia rur parownika stosowane są różne rozwiązania, które przepływowo sprowadzają się do dwóch przypadków.

c/ z krótką pętlą cyrkulacyjną poprzez pompę cyrkulacyjną - rozruchową, jest to system zbliżony do a/ tylko stosowany przy częściowych obciążeniach,

d/ z długą pętlą cyrkulacyjną poprzez zbiornik wody zasilającej, kondensator lub rozprężacz i stację uzdatniania wody. Zakresy stosowania różnych układów parownika podano na rys. 1.

Widoczne jest, że system czysto przepływowy z rurami skośnymi w parowniku nie jest ograniczony ani wielkością bloku, ani ciśnieniem pary. Możliwy jest też do stosowania przy pracy kotła z ciśnieniem stałym i poślizgowym. System z dodatkową cyrkulacją w parowniku w pełnym zakresie obciążeń posiada kilka ograniczeń.

Wydajnościowo granice wynikają z zapewnienia pewnej krotności cyrkulacji, która ze względów na ograniczone gabaryty butli nie powinna być większa od 1,7, ani oczywiście równa 1. Tak więc nie buduje się kotłów bezwalczakowych z pełną recyrkulacją o wydajności mniejszej od 600 t/h i większej od 2500 t/h. Przy mniejszych wydajnościach konieczne jest stosowanie walczaka dla zapewnienia poprawnej separacji pary, przy większych uzyskujemy system czysto przepływowy z recyrkulacją w niepełnym zakresie obciążeń.

Najbardziej jednoznacznym wyróżnikiem oddzielającym kocioł czysto przepływowy od wszystkich innych jest umieszczenie punktu odparowania. Kotły z cyrkulacją naturalną i wspomaganą oraz kotły bezwalczakowe pracujące z mokrą butlą posiadają stały punkt odparowania umieszczony w walczaku lub butli.

Kotły przepływowe posiadają wędrujący punkt odparowania umieszczony między butlą o około połowę wysokości parownika. Kotły BB-1150 dla el. Bełchatów należą do typu kotłów z wymuszoną cyrkulacją w parowniku

i posiadają stały punkt odparowania.
W Rafako powstały projekt kotła czysto przepływowego ze zmiennym punktem odparowania, dla el. Zatonie. Projekt ten nie doczekał się jednak realizacji. Został natomiast skonstruowany i wykonany na bazie projektu EVT kocioł BB-1880 dla el. Obrenovacz w Jugosławii. Jest to kocioł czysto przepływowy ze spiralnym owinięciem komory paleniskowej.
Tak więc w dziedzinie kotłów przeznaczonych dla energetyki zawodowej, w zakresie ciśnień podkrytycznych w Rafako zastosowano w rozwiązaniach projektowych wszystkie podstawowe rozwiązania odnośnie systemów obiegowych czynnika.
W krajach najbardziej rozwiniętych, oraz w ZSRR stosuje się kotły na ciśnienie nadkrytyczne. W Polsce takich kotłów się nie buduje, barierą jest dostępność materiałów na części ciśnieniowe, armatura oraz urządzenia pomocnicze.
Największe kotły opalane węglem kamiennym zostały zbudowane w USA.

Tabela 1

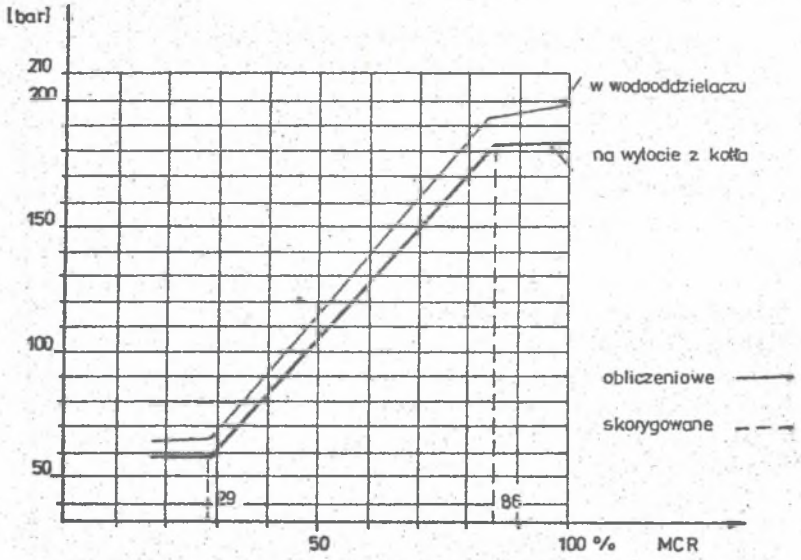
L.p	Nazwa Elektrowni	Lokalizacja	Użytkownik	Moc bloku MW	Wydajność t/h	Węgiel Wd MC	Rok uruchom. bloku
1	CUMBERLAND No 1,2	Cumberland City Tennensee	Tennensee Valley Authority	1 300	4 220	BIT 6,2	1972
2	AMOS No 3	Vic. of Charleston W. Virginia	Ohio Power Corporation	1 300	4 430	BIT 5,6	1973
3	BELLEWS GREEK No 1,2	Walnut Cove N. Carolina	Duke Power Corporation	1 140	3 310	BIT 5,4	1974
4	GAVIN No 1,2,3,4	Cheshire Ohio	Ohio Power Corporation	1 300	4 430	BIT 5,6	1974
5	MOUNTAINEER No 1	New Haven W. Virginia	Appallachian Power Corporation	1 300	4 430	BIT 6,1	1980
6	ROCKPORT No 1,2	Rockport Indiana	Indiana Michigan Electric Corporation	1 300			1981

Największe kotły parowe opalane węglem kamiennym
Largest bituminous coal fired boilers

5. Rodzaj współpracy kotła z turbiną

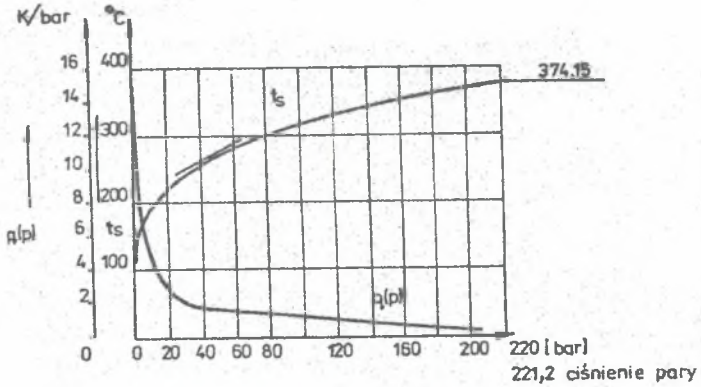
Wszystkie kotły energetyczne budowane w kraju dla bloków 200 MW włącznie, były budowane jako kotły pracujące w układzie kolektorowym lub blokowym, ze stałym ciśnieniem na wylocie z kotła.
Kocioł AP-1650 dla bloków 500 MW został też zaprojektowany do pracy z ciśnieniem stałym. Pierwszym kotłem pracującym z ciśnieniem poślizgowym był kocioł BB-1150 el. Bełchatów, następnym będzie BP-1150 el. Opole.
W obu wypadkach zastosowano ciśnienie poślizgowe modyfikowane.
Modyfikowane ciśnienie poślizgowe jest obecnie powszechnie stosowanym rodzajem współpracy kotła z turbiną w dużych blokach energetycznych budowanych na świecie. Ze względu na niepowszechność tego rodzaju współpracy w Polsce, celowe będzie przywołanie podstawowych cech charakterystycznych obu systemów. Przez bardzo długi okres czasu w energetyce stosowano układy współpracy kotła z turbiną przy stałym ciśnieniu pary za kotłem. Zasadniczą zaletą tego układu jest łatwość regulacji bloku, jego zasadniczą wadą jest duże wyczerpanie żywotności korpusów turbiny ze względu na nagłe zmiany temperatury pary oraz straty sprawności bloku wynikłe z procesu dławienia pary, oraz zwiększenie poboru mocy pomp wody zasilającej.
Istotą pracy bloku z ciśnieniem poślizgowym jest praca przy całkowicie otwartych zaworach regulacyjnych turbiny.
W takim wypadku występują:
- korzystniejsze warunki pracy turbiny z uwagi na stałą temperaturę pary w poszczególnych ich stopniach. /brak zmian temperatury wskutek dławienia/,
- możliwość utrzymania w szerokich granicach obciążeń kotła znamionowej temp. pary,
- większa ekonomia pracy układu dzięki zmniejszonej energii na tłoczenie wody i zwiększenie sprawności turbiny.

Praca bloku z naturalnym ciśnieniem poślizgowym charakteryzuje się jednak tym, że duża zdolność akumulacyjna kotła nie zezwala na szybkie zmiany obciążenia bloku. Usunięcie tej wady polega na tym, że np. w kotle BB-1150 el. Bełchatów dla obciążeń w granicach 86 - 100 % ciśnienie przed turbiną utrzymywane jest na stałym poziomie jednym z czterech zaworów regulacyjnych, w zakresie obciążeń 29 - 86 % trzy zawory regulacyjne są całkowicie otwarte a czwarty zamknięty, natomiast przy obciążeniu kotła mniejszym niż 29 % regulację obciążenia przyjmuje układ regulacji kotła.
Na rys. 3 przedstawiono przebieg ciśnienia za kotłem w funkcji obciążenia kotła.
Rys. 4 [4] wyjaśnia dlaczego w zakresie 0 - 29 % obciążenia kotła elementy grubościenieniowe kotła nie mogą pracować z ciśnieniem poślizgowym. Mianowicie w tym zakresie małym zmianom ciśnienia odpowiadają duże zmiany temperatury. Tak więc elementy ciśnieniowe kotła żeby nie



Rys. 3
Kocioł BB-1150 el. Bełchatów
Przebieg ciśnienia modyfikowanego w funkcji obciążenia kotła
Boiler BB-1150 Power Station Bełchatów
Modified sliding pressure vs boiler load

ograniczać szybkości zmian obciążenia nie powinny posiadać elementów grubościennych. Determinuje to więc wybór kotłów bezwalczakowych jako tych, które są przydatne do pracy z ciśnieniem poślizgowym. Zastosowanie butli w miejsce walczaka też nie eliminuje zupełnie problemu, co można odczytać z załączonej tabeli 2.



t_s = temperatura

$$q(p) = \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

Rys. 4

Właściwości pary wodnej
Przebieg temperatury nasycenia w funkcji ciśnienia

Water steam properties
Saturation temperature vs pressure

Tabela 2

GRZANIE		STUDZENIE	
MPa	°C/min	MPa	°C/min
0 — 5	4	20 — 15	3
5 — 10	8	15 — 10	6
10 — 15	12	10 — 5	11
15 20	16	5 — 0	17

Dozwolone szybkości nagrzewania i chłodzenia butli kotła BB-1150 el. Bełchatów

Permissible heating and cooling rates of the separator of the boiler BB-1150 PS Bełchatow

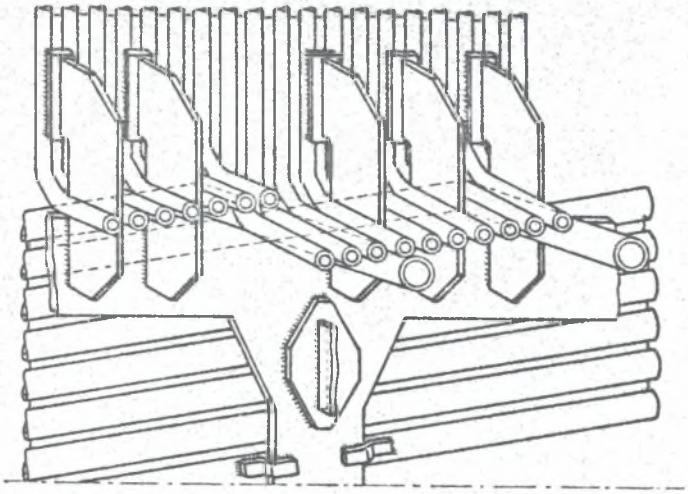
6. Sylwetki kotłów

Projektowane kotły w Rafako opalane węglem kamiennym i brunatnym przeznaczone dla energetyki zawodowej do mocy 200 MW włącznie, posiadały sylwetkę dwuciągową. Zaletą tej sylwetki to zwartość budowy, dogodność montażu, łatwiejsze dostosowanie konstrukcji do warunków sejsmicznych, szkód górniczych i parcia wiatru. Cechami ujemnymi jest duże zapotrzebowanie terenu pod zabudowę i trudniejsze warunki ustawiania urządzeń pomocniczych. Kotły dla bloków większych o mocy 360 MW były zaprojektowane jako kotły jednociągowe. Każda z tych sylwetek stwarza inne warunki dla przepływu spalin. Sylwetka jednociągowa zapewnia przepływ spalin przez powierzchnie ogrzewalne bez zmiany kierunku, co pozwala siłą grawitacji na zmniejszenie szybkości przepływu cząstek popiołu w stosunku do szybkości przepływu spalin, a przez to zmniejsza się intensywność erozji popiołowej. Do istotnych zalet konstrukcji jednociągowej należy łatwość zastosowania ścian szczelnych typu membranowego. Unika się w tym rozwiązaniu bardzo trudnego ekranowania międzyciągu i ścian drugiego ciągu, a zwłaszcza skomplikowanych połączeń rurami nad stropem kotła. Ponadto sylwetka jednociągowa umożliwia zaprojektowanie wszystkich powierzchni ogrzewalnych przegrzewacza i eco w układzie poziomym, co umożliwia całkowite odwodnienie kotła. Do niebagatelnych zalet sylwetki jednociągowej należy łatwość ustawienia urządzeń pomocniczych, zwłaszcza młynów.
Do cech ujemnych tej sylwetki należą takie czynniki, jak utrudnienie montażu, gorsze dostosowanie do sił sejsmicznych i parcia wiatru oraz trudniejsze konstrukcyjnie zaprojektowanie podgrzewacza wody.
W rozwiązaniach stosowanych przez uznane firmy światowe zaobserwować można pewne tendencje, które preferują sylwetkę jednociągową dla kotłów opalanych węglem brunatnym, mieszane rozwiązania dla węgla kamiennego oraz sylwetki dwuciągowe dla dużych kotłów opalanych olejem, względnie sylwetki kotłów wieżowych /komin na kotle/ dla mniejszych kotłów opalanych olejem lub gazem.
Projekty wykonane przez Rafako mieszczą się całkowicie w tych trendach.

7. Rozwiązania konstrukcyjne

Rozwiązania konstrukcyjne kotłów parowych w zakresie części ciśnieniowej od lat nie ulegają zasadniczym zmianom. Ostatnimi nowościami było stosowanie ścian szczelnych oraz spiralnych owinięć komory paleniskowej. Elementem konstrukcyjnym niezdeterminowanym jednoznacznie, co do swoich zalet i wad jest przejście ze ściany skośnej w pionową. Problem ten jest rozwiązywany w świecie w dwojaki sposób:

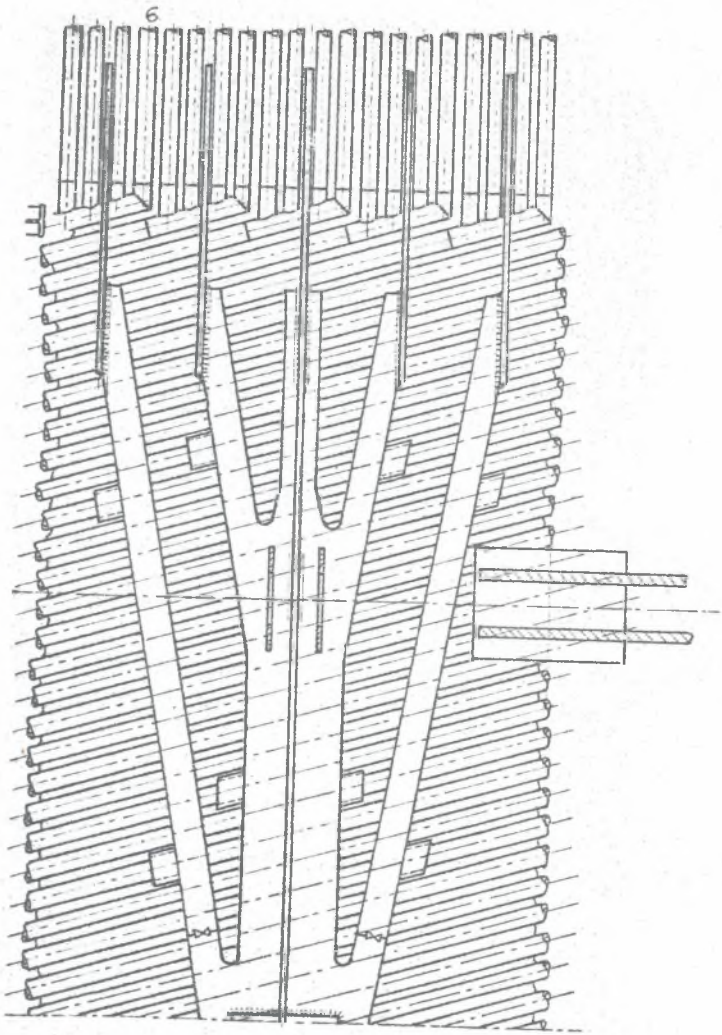
a/ przejście za pomocą komór (rys. 5)
b/ przejście za pomocą rozgałęźników (rys. 6 i rys. 7)



Rys. 5
Ściany szczelne parownika
Przejście orurowania skośnego w pionowe poprzez komory

Evaporator water - walls
Transition from spiral - wound tubes to vertical tubes by means of header

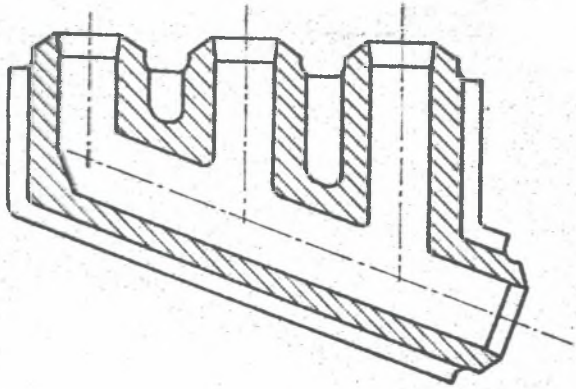
Rozwiązanie a/ jest bardziej materiałochłonne, zapewnia jednak dobre wymieszanie czynnika powodując wyrównanie ciśnień, rozwiązanie b/ jest ekonomiczniejsze daje jednak większe rozrzuty temperatur na wylocie z parownika, aczkolwiek mieszczące się jeszcze w granicach dopuszczalnych. W praktycznych rozwiązaniach Rafako zastosowano rozwiązanie typu b/. Do ciekawszych rozwiązań konstrukcyjnych jakie miały miejsce w Rafako było zastosowanie w kotle AP-1650 el. Kozienice (rys. 8) ekranu dwustronnie opromieniowanego. Rozwiązanie to znalazło zastosowanie jedynie w tym kotle, wzorowanym na podobnej jednostce postawionej w LA HAVRE Francja. Nowym elementem konstrukcyjnym wprowadzonym do techniki kotłowej jest rura parownikowa gwintowana wewnątrz, w rozwiązaniach Rafako nie była ona dotychczas stosowana.



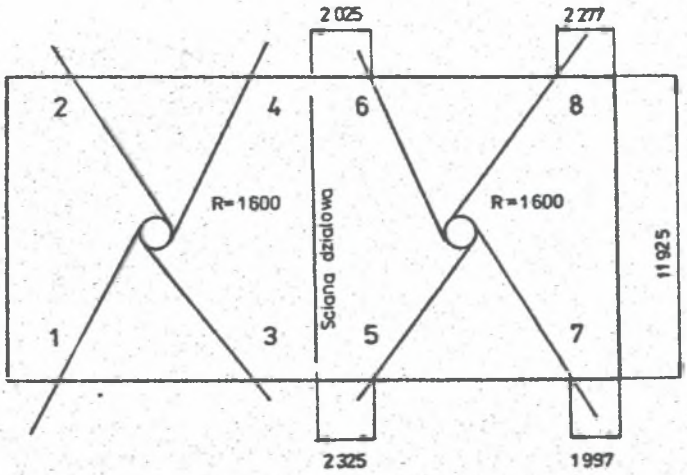
Rys. 6.

Ściany szczelne parownika
Przejście orurowania skośnego w pionowe poprzez rozgałęźniki

Evaporator water - walls
Transition from spiral - wound tubes to vertical tubes by means of bifurcation pieces.



Rys. 7.
Rozgałęźnik
Bifurcation piece



Rys. 8.
Kocioł AP - 1650 el. Kozienice
Usytuowanie ściany działowej /ekran dwustronnie opromieniowany/ oraz palników pyłowych w komorze paleniskowej.
Jeden młyn zasila jeden poziom palników od / 1 - 8 /

Boiler AP - 1650 PS Kozienice
Position of division wall /bi - radiant screen/ in combustion chamber and arrangement of pulverized - coal burners. One mill feeds one level of fuel nozzes /1-8/

8. Podstawowe problemy projektowe

Wieloletnie doświadczenie RAFAKO w projektowaniu kotłów pozwoliło na wyselekcjonowanie tych elementów projektu, które stanowią jego najsłabsze ogniwo.
Podstawowym problemem ciągle nierozwiązanym w stopniu zadawalającym jest poprawne zaprojektowanie komory paleniskowej. Trzeba tu jednak zaznaczyć, że pod pojęciem poprawne zaprojektowanie być może rozumiane jest osiągnięcie stanu idealnego, niemożliwego do uzyskania w praktyce. Elmer John Badin /USA/ w swojej książce [5] " Coal combustion chemistry - correlation aspects " podaje sumę $ 500 milionów jaka jest tracona rocznie w energetyce zawodowej USA na skutek niedoskonałego w stosunku do możliwości teoretycznych spalania węgli w komorach kotłów parowych.
W wypadku Rafako podstawowy problem nietrafienia komory paleniskowej sprowadza się do doboru komór mających tendencje do mniejszego niż to wynikałoby z obliczeń przejmowania ciepła.
Zjawisko to wystąpiło w kotłach OB-660 zainstalowanych w el. Prunerov - Czechosłowacja. Komora paleniskowa tego kotła przejmowała mniej ciepła co doprowadziło do znacznego zwiększenia wtrysków za pierwszym stopniem przegrzewacza pary. Profil najwyższych temperatur płomienia w komorze paleniskowej przesunięty został w rejon przed grodziami, co doprowadziło też do występującego okresowo szlakowania górnej części komory paleniskowej. W kotłach tych używa się praktycznie dwa razy na zmianę zdmuchiwaczy wodnych komory paleniskowej. Jest to operacja konieczna ze względu na możliwości uzyskania pełnej mocy kotła.
Nie oznacza to jednak, że proste powiększenie komory paleniskowej w wypadku kotła BB-660 dla el. Prunerov było by uzasadnione. Przewymiarowanie komory prowadzi bowiem do zmniejszenia minimum technicznego kotła czy wręcz pogorszenia procesu spalania. Proste podwyższanie jedynie wysokości komory paleniskowej jest cieplnie mało efektywne a prowadzi do znacznego zwiększenia kosztów materiałowych.
Można więc uznać, że skutki nietrafienia poszły w najdogodniejszym kierunku, to znaczy przy nieproblemowym szlakowaniu, poprawnym spalaniu i dotrzymaniu minimum technicznego. Jedynym mankamentem kotła jest zwiększona ilość wody do schładzaczy przegrzewaczy pary.
Podobne problemy wystąpiły też w kotle OB-660 el. Yatagan. Tu też wystąpiło przesunięcie najwyższych temperatur w rejon przedgrodziowy, co w efekcie doprowadziło do zwiększenia wtrysków powyżej wielkości obliczeniowych oraz doprowadzało do zaszlakowywania usysów młynowych. W kotle tym nie wystąpiła jednak potrzeba używania wodnych zdmuchiwaczy sadzy jako środka umożliwiającego utrzymanie pełnej mocy kotła. Zaszlakowane usysy oczyszcza się za pomocą mechanicznej lancy chłodzonej powietrzem. Bliższe rozpoznanie procesu spalania wykazało, że płomień jest bardziej rozciągnięty, sięga do przegrzewacza grodziowego a temp.

spalin na wylocie z komory paleniskowej jest około 80°C wyższa od przyjętej w projekcie. Spowodowało to: zwiększenie wtrysków do pary pierwotnej do 130 T/h, co parokrotnie przekroczyło wartości obliczeniowe, oraz zwiększenie odparowania w podgrzewaczu wody.
Analogiczne problemy wystąpiły też w kotle BB-1150 el. Bełchatów, gdzie komora paleniskowa przejmuje około 20 % mniej ciepła niż wg obliczeń cieplnych. Problemy kotłów el. Bełchatów zostały przedstawione na Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo - Technicznej, która miała miejsce w Bełchatowie 26 - 27 września 1985. Nie tylko w kotłach opalanych węglem brunatnym wystąpiło zjawisko mniejszej efektywności komory paleniskowej. Wystąpiło ono też w kotle AP-1650 el. Kozienice, gdzie zbyt duże ilości wtrysków do powierzchni przegrzewaczowych doprowadziły do usunięcia przegrzewacza naściennego.
Przyczynę rozbieżności jakie występują pomiędzy obliczeniami teoretycznymi a rzeczywistością, należy szukać w niedoskonałości obliczeń komór paleniskowych z recyrkulacją wewnętrzną /przez młyny/ oraz zbyt jednostronnym doborem stopnia zabrudzenia ścian komory paleniskowej.
Ponieważ jest bardzo trudno określić stopień zabrudzenia komory paleniskowej dla danego węgla, to warto przynajmniej przywołać te parametry, które na proces wymiany ciepła w komorze paleniskowej wpływają.
Komora paleniskowa przejmuje około 95 % ciepła na drodze promieniowania. Przejmowanie tego ciepła jest zależne od składu chemicznego zanieczyszczeń znajdujących się w spalanym węglu.
Wpływ oddziaływania tych zanieczyszczeń można by było usystematyzować w następujący sposób: [wg 5] .

1. Przewodność cieplna osadów zależy od:
   a/ temperatury osadu, ze zmianą temperatury zmienia się przewodność cieplna osadów,
   b/ zmiana temperatury osadu powoduje zmianę stanu skupienia osadu,
   c/ zmiana stanu skupienia osadu wpływa na jego przewodność cieplną w ten sposób, że ze wzrostem wielkości ziaren wzrasta ich przewodność.

2. Zdolność wypromieniowania ciepła przez osady zależy od:
   a/ wielkości ziaren. Ze wzrostem ziaren wzrasta zdolność wypromieniowania ciepła.
   b/ Temperatury osadu. Ze wzrostem temperatury zmniejsza się wypromieniowanie ciepła.

3. Zdolności wypromieniowania ciepła przez żużel zależą od:
   a/ składu chemicznego żużla,
   b/ lepkości żużla.

4. Zdolności wypromieniowywania ciepła przez płomień zależą od:
   a/ temperatury płomienia,
   b/ wielkości spalanych cząsteczek,

c/ wielkość spalanej cząsteczki ma wpływ na temperaturę topnienia.

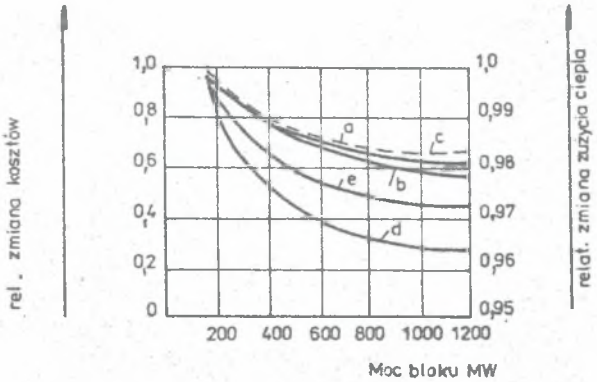
5. Zdolność przejmowania ciepła przez ekrany zależy od koloru osadów:
   a/ jasne naloty odbijają więcej ciepła,
   b/ ciemne naloty przejmują więcej ciepła.

6. Ekranowanie komory paleniskowej zimnymi spalinami:
   a/ w paleniskach tangencjalnych wychłodzona warstwa spalin przy ekranach zmniejsza wymianę ciepła,
   b/ duża lepkość spalin gorących znacznie utrudnia mieszanie się spalin.

Teoretyczne rozeznanie czynników mających wpływ na przejmowanie ciepła w komorze paleniskowej nie rozwiązuje problemów praktycznych.
W przypadku spalania naszych rodzimych węgli problem ten należy uznać za nadal nierozwiązany. W tej dziedzinie projektant ciągle jest zdany bardziej na intuicję, niż wiarygodne dane. Wg opinii firmy CE dobór komory paleniskowej jest ciągle jeszcze bardziej sztuką niż wiedzą.

9. Stosowane wielkości kotłów

Kotły energetyczne w zależności od rodzaju spalanego paliwa, posiadają swoje górne granice co do wielkości w jakich zostały zbudowane. Wynika to zarówno z punktu widzenia ekonomicznego jak i aktualnego stanu możliwości technicznych.
Rys. 9 ilustruje zależności ekonomiczne ważne na obszarach walut wymienialnych. Wykres ten został zrobiony w oparciu o kryterium jednakowej niezawodności bloków 300 i 600 MW. Z wykresu można odczytać, że przejście z bloku 300 MW na blok 600 MW daje około 15 % zmniejszenia kosztów inwestycji. Dalsze zwiększanie mocy bloku nie daje już tak widocznych korzyści ekonomicznych [6]. Z wstępnych danych literaturowych można wnioskować, że bloki 800 i 1300 MW nie osiągają już takiego stopnia niezawodności jak bloki 600 MW. Uważa się też, że ze względów czysto konstrukcyjnych można określić pewne górne granice kotłów. I tak dla kotłów opalanych olejem górną granicą będzie blok o mocy 2400 MW. Kocioł dla tego bloku posiadałby przekrój komory paleniskowej 25,2 x 25,2 m i wysokości ok. 136 m. Dla węgla kamiennego w przypadku kotła jednociągowego byłby to kocioł o mocy 1200 MW, który by się charakteryzował przekrojem komory paleniskowej 23 x 23 m i wysokością ok. 160 m.
Dla węgli brunatnych w przypadku kotła jednociągowego górną granicą w typuszeregu 300 - 600 - 1200 - 2400 MW wydaje się być kocioł o mocy 600 MW o przekroju komory paleniskowej 20 x 20 m i wysokości ok. 134 m przy zachowaniu temp. spalin na wylocie z komory paleniskowej rzędu ok. 1000 °C. Z punktu widzenia konstrukcyjnego wielkość kotła ogranicza zdolność nośna ścian parownika, które tracą zdolność uniesienia ciężaru



a koszty inwestycyjne, bloki na węgiel kamienny

b koszty inwestycyjne, bloki na węgiel kamienny

c koszty inwestycyjne, bloki na węgiel brunatny

d koszty obsługi, bloki na węgiel kamienny

e zużycie ciepła, bloki na węgiel kam. i brunatny

Rys. 9.
Zmiany kosztów w funkcji mocy bloku
Variation of costs vs power unit ratings

własnego oraz zasypania leja popiołowego popiołem. Należy zwrócić uwagę i na to, że spadająca szlaka w komorze paleniskowej kotła bloku 600 MW opalanego węglem brunatnym uderza w lej tej komory z prędkością około 125 km/h, co wymaga przedsięwzięcia odpowiednich środków zaradczych.

Biorąc pod uwagę wielkość naszego kraju można uznać, że kotły przeznaczone dla bloków 360 MW mieszczą się w tym optymalnym zakresie bloków 300 - 600 MW i że wychodzenie w projektach poza bloki 600 MW nie byłoby racjonalne. Tabela 1 [7] przedstawia największe kotły opalane węglem kamiennym zainstalowane na świecie.

10. Typy palenisk

W swoich rozwiązaniach dla dużych kotłów energetycznych Rafako stosuje palniki pyłowe strumieniowe zwane też palnikami tangencjalnymi.

Ten typ palników daje równomierne wypełnienie komory paleniskowej płomieniem. Wybór optymalnego koła zawirowania zapewnia taki proces spalania, w którym nie dochodzi do zetknięcia się płomienia ze ścianami parownika kotła. Ponadto palenisko charakteryzuje się wtedy:

- dobrą stabilnością spalania,
- dużą nieczułością na nierównomierne rozdzielenie pyłu względem powietrza na pojedynczym palniku,
- relatywnie niską maksymalną temperaturą płomienia. Ten typ paleniska daje niską zawartość No_x w spalinach.

W okresie lat sześćdziesiątych, kiedy problem zanieczyszczenia atmosfery nie był jeszcze problemem pierwoszoplanowym, były modne kotły z paleniskami cyklonowymi i płynnym odprowadzeniem żużla. Według danych literaturowych w roku 1979 [8] w RFN na 41 milionów ton węgla spalanego w paleniskach cyklonowych spalano 28 mln ton. Problem palenisk cyklonowych odżywa co jakiś czas i u naszych inwestorów. Rafako wykonała [9] analizę porównawczą kotła OP-430 z paleniskiem konwencjonalnym z kotłem OPG-430 z paleniskiem cyklonowym. Wyniki analizy zawiera tablica 3 i tablica 4.

Tabela 3

ZESPÓŁ	Ciężar kotła /mg/		WSP x	Koszt kotła /10⁶ zł/	
	OP-430	OPG-430		OP-430	OPG-430
Część ciśnieniowa	857	561	0,65	—	—
Konstrukcja nośna	1530	995	0,65	—	—
Część paleniskowa	1450	1450	—	—	—
	3837	3006	0,78	480	375

Analiza porównawcza kotła parowego o wydajności 430 t/h pary
OP-430 kocioł z paleniskiem pyłowym palniki strumieniowe suche odprowadzenie żużla.
OPG-430 Kocioł z paleniskiem cyklonowym płynne odprowadzenie żużla

Comparison analysis of 430 t/h steam boilers
OP-430 Boiler with PF burners and dry bottom slag removal
OPG-430 Boiler with cyclone burners wet bottom slag removal

Tabela 4

L.P.	Oceniana właściwość	PALENISKO	
		CYKLON	KLASYCZ.
1	Zm. własności fizykochemiczne węgla	---	+++
2	Spalanie węgli wilgotnych	--	++
3	Spalanie węgli niskokalorycznych	--	++
4	Spalanie węgli o niskiej zawartości części lotnych	++	--
5	Koszty przemiału węgla	+	-
6	Usuwanie zastygłego żużla	---	0
7	Możliwości zagospodarowania żużla	+++	-
8	Straty ciepła wynikłe z gaszenia żużla	---	0
9	Strata wylotowa	++	--
10	Zużycie energii na potrzeby własne	--	++
11	Sprawność kotła	-	+
12	Emisja pyłów do atmosfery	+++	---
13	Emisja SO_x	=	=
14	Emisja NO_x	--	++
15	Czas rozruchu kotła	=	=
16	Dyspozycyjność kotła	--	++
17	Minimum techniczne kotła	--	++
18	Odporność na erozję	+++	---

Właściwości kotłów parowych opalanych węglem kamiennym z paleniskiem cyklonowym i klasycznym
Palenisko cyklonowe - płynne odprowadzenie żużla,
Palenisko klasyczne - palniki pyłowe strumieniowe suche odprowadzenie żużla.

Characteristics of bituminous - coal fired boilers with cyclone type and vonventional type furnace
Cyclone furnace - wet bottom slag removal
PF furnace - dry bottom slag removal

Rafako wyprodukowała jedynie trzy jednostki kotła cyklonowego dla KWK Moszczenica oznaczone jako OCG-64.

11. Rozwiązania specjalne

Nowym problemem, który wymaga rozwiązania, jest problem posadowienia kotłów na terenach objętych oddziaływaniem szkód górniczych [9] . W tej

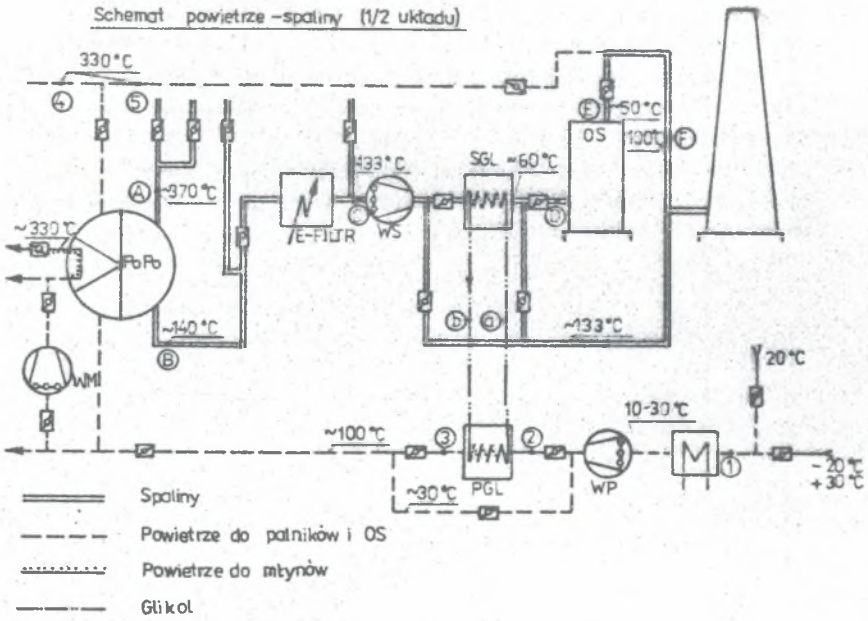
dziedzinie nie zostały jeszcze wypracowane ostateczne rozwiązania projektowe i konstrukcyjne.
Rozpatrywane są różne warianty rozwiązań, w których odnotować można następujące kierunki:

1. Założono, że część kotłowa budynku głównego stanowi w sobie samodzielną całość i nie współpracuje statycznie z pozostałymi częściami obiektu, to jest bunkrownią i maszynownią.
2. Umożliwiona zostanie rektyfikacja pozioma wzdłuż osi kotła oraz poprzeczna do osi kotła.
3. Kocioł nie będzie wymagał rektyfikacji dla przechyłu do T = 2 mm/m Oznacza to, że zarówno w części ciśnieniowej jak i młynów, konstrukcja elementów zmieniających swoje położenie pod wpływem działania sił ciężkości posiadają przewidziane układy kompensacyjne.
4. Fundamenty młynów usytuowane poza obrysem projektowanego członu kotłowni zostaną dowiązane ściągami do fundamentów budynku kotłowni.
5. Maszyny wirujące będą ustawione na osobnych fundamentach, umożliwiających rektyfikację od odchyleń ustalonych z dostawcami tych urządzeń,
6. Rektyfikacja kotła będzie dokonywana na ruszcie nośnym kotła. Pod belkami rusztu będzie istniała możliwość ustawiania podnośników hydraulicznych do rektyfikacji pionowej.

Zaistnieje też potrzeba zabudowania na kotle całego szeregu urządzeń do pomiarów przemieszczeń, innego rozwiązania pomiaru poziomu wody w walczaku oraz rozwiązanie całego szeregu problemów kompensacyjnych.

12. Ochrona środowiska

W ostatnim okresie został wykonany w Rafako projekt [10] dostosowujący instalację odsiarczania spalin do współpracy z kotłem OP-230. Istotą działania tego systemu jest schładzanie spalin kotłowych do temp. ok. 60 °C jako najbardziej optymalnej dla procesu zachodzącego w kolumnie OS /odsiarczania spalin/. Czynnikiem schładzającym spaliny i podgrzewającym powietrze jest glikol krążący w dwóch wymiennikach, schładzaczu SGL i podgrzewaczu PGL. Oczyszczone spaliny, przed wejściem do komina muszą być podgrzane ponownie do około 100 °C. Dzieje się to poprzez mieszanie spalin opuszczających kolumnę OS z gorącym powietrzem czerpanym z za obrotowych podgrzewaczy powietrza. Rys. 10 przedstawia rozmieszczenie podstawowych urządzeń oraz rozkład temperatur czynnika. Sprawność działania tej instalacji szacuje się na około 80 %.
W przypadku wdrożenia tego systemu do realizacji, byłby to znaczący krok w kierunku oczyszczenia spalin ze związków siarki, zapoczątkowujący w naszym przemyśle kotłowym szersze działania na polu ochrony środowiska, tak niezmiernie istotnego dla nas wszystkich.



Rys. 10
Współpraca instalacji odsiarczania spalin z kotłem
Co - operation of SO_2 - removal plant with the boiler

13. Tendencje rozwojowe w budowie kotłów

Klasyczne konstrukcje dużych kotłów energetycznych przeznaczonych dla energetyki zawodowej opalane paliwami kopalnianymi osiągnęły już swoje apogeum.

Obecnie wysiłki wytwórców idą w kierunku ulepszeń istniejących konstrukcji.

Główne działania są skierowane w następujących kierunkach:

- przebudowa kotłów olejowych na węglowe,
- zastąpienie rozpalania olejowego instalacjami pyłowymi,
- dostosowanie kotłów do spalania paliw niekalorycznych z dużą zawartością popiołu,
- minimalizowanie strat rozruchowych,

- pełnej automatyzacji rozruchów,
- dostosowania kotłów do współpracy z instalacjami oczyszczania spalin,
- uzyskiwania procesów spalania minimalizujących wytwarzanie No_x,
- posadowienia kotłów na terenach szkód górniczych,
- zastosowania rur gwintowanych w komorach paleniskowych oraz rur ożebrowanych w podgrzewaczach wody w przypadkach technicznie uzasadnionych,
- zastosowania podwójnego stopnia przegrzewu pary,
- umiejętności oceny stopnia zużycia elektrowni a zwłaszcza umiejętności oceny zużycia elementów ciśnieniowych kotła.

Nie widać natomiast tendencji do dalszego zwiększania mocy bloków, względnie podnoszenia parametrów pracy, zwłaszcza temperatury pary. Osobnym zagadnieniem są inne typy palenisk, zwłaszcza paleniska fluidalne, które w dużych jednostkach kotłowych przeznaczonych dla energetyki zawodowej nie znalazły miejsca, i dlatego nie są ujęte w niniejszym opracowaniu.

LITERATURA

1. Kuraś J.F.: Kotły 35-lecie RAFAKO. Dozór Techniczny 1/1985.
2. Leithner R.: Vergleich zwischen Zwangdurchlauferzeuger. Zwangdurchlaufdampferzeuger mit Vollastumwalzung und Naturumlaufdampferzeuger. EVT, Bericht 76/84.
3. Ecabert K., Miszak P.: Once - through boilers with vertical or heliosl turing Sulzer Technical Review 3/1980.
4. Pich R.: Naherungsgleichung für die Sättigungstemperatur von Wasserdampf. EVT, Bericht 67/81.
5. Badin E.J.: Coal combustion chemistry - correlation aspects. Coal Science and technology 6 ELSEVIER 1984.
6. Seefeldt K.P., Wadman H.: Grenzleistungsprobleme bei Fossilgefeuerten. Grossdampferzeugern. EVT, Bericht 34/75.
7. Tomas D.: Młyny średniobieżne na świecie. Publikacja wewnętrzna RAFAKO, 1984.
8. Kantner A.: Trocken - oder Schmelzeuerung für Steinkohle. VGB, 2/1980.
9. Kuraś J.F.: Kocioł OP-430 i OPC-430 Posadowienie na terenie II kat. szkód górniczych. Analiza porównawcza. Publikacja wewnętrzna RAFAKO 1984.
10. Kuraś J.F.: Kocioł OP-230 Gliwice I projekt ofertowy. Analiza układu podgrzania spalin. Opracowanie RAFAKO 1985.

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ В "РАФАКО" ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОТЛЫ
НА ФОНЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Р е з ю м е

В докладе представлен профиль продукции "Рафако". Названы заграничные фирмы, с которыми имеются лиценционные связи или договоры о сотрудничестве. Представлены типы запроектированных в "Рафако" котлов. Рассмотрены применяемые циркуляционные схемы, компоновка котлов и их работа с турбиной. Даны примеры конструкторских решений. Рассмотрены не решенные до конца проектные задачи, в том числе проектирование топок для сжигания каменного и бурого угля.

Оговорены факторы, ограничивающие размеры проектируемых котлов. Представлены применяемые в "Рафако" типы топок. Проведен сравнительный анализ котлов производительностью 430 т/час с классической топкой и с циклонной. На примере котлов, работающих в районах горных работ, показаны применяемые специальные решения. Рассмотрена совместная работа котла с сероочищающей установкой. Оговорены направления развития котельной техники.

RAFAKO'S STEAM GENERATOR DESIGN IN VIEW
OF WORLD TRENDS

S u m m a r y

This paper contains description of the range of production of RAFAKO. Reference is made to those companies with whom RAFAKO has licence arrangements or cooperation agreements. The types of boilers designed by RAFAKO are described. Types of circulation, mode of cooperation with the turbine and shapes of the boilers are also described and examples of design detail given. Some design problems not yet solved entirely such as those of designing combustion chambers ofr lignite and bituminous coal, are outlined.

Types of furnace systems applied in the RAFAKO designs are presented. The comparison of 430 t/hr boilers with conventional and cyclone furnaces are examined. Special design solutions for the boilers to be installed in the area of mining damages are discussed. An example of coordination of sulphur removal system with the steam generator is given. Reference is made to the development tendencies in the field of boiler making.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.