

Wacław DOBRZAŃSKI

Politechnika Warszawska

KRYTERIA DOBORU PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH
I PRZEPIYWOWYCH PAROWNIKÓW KOTŁÓW ZE WSPOMAGANĄ
I WYMUSZONĄ CYRKULACJĄ Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNYCH
WARUNKÓW PRACY

Streszczenie. Przedstawione zostały kryteria doboru podstawowych parametrów obiegu wspomaganego i wymuszonego w kotłach. Kryteria: minimalnego strumienia masy, maksymalnego stopnia suchości pary i stabilności przepływu prowadzą do ustalenia wielkości oporów przepływu kryz dławiących na wlocie do rur parownika. Wyznaczenie charakterystyk przepływowych konturów cyrkulacyjnych pozwala na dobór pomp obiegowych i ustalenie optymalnego sposobu ich eksploatacji w zmiennych warunkach pracy kotła.

Współczesny rozwój kotłów energetycznych dużej mocy uwidocznił się szczególnie w zmianach dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych oraz sposobu pracy podstawowego zespołu kotła, jakim jest parownik. Kotły walczakowe z cyrkulacją naturalną zastępowane są powszechnie przez kotły walczakowe i bezwalczakowe z cyrkulacją wspomaganą i wymuszoną. Polskimi reprezentantami tego typu kotłów są kotły AP-1650 i BP-1150. Konstrukcyjnie kontury cyrkulacyjne parowników obu typów nie różnią się w zasadzie między sobą: pionowe rury wznoszące tworzą ekrany komory paleniskowej, walozak i wodooddzielacz stanowią urządzenie dla separacji pary i mieszaniny parowo-wodnej, w układzie opadowym zainstalowane są pompy obiegowe. Kotły różnią się w zasadzie pracy parownika krotnością cyrkulacji. W walozakowym kotle AP-1650 krotność cyrkulacji wynosi ok. 3,5, w bezwalczakowym BP-1150 - 1,5. W kotle pierwszym siły wyporu naturalnego są bardzo znaczne, pompy "wspomagają" jedynie obieg wody, przez co obieg tego typu nazwano wspomaganym. Kocioł drugi jest bardziej zbliżony do kotła przepływowego, udział siły wyporu naturalnego jest mniejszy, przepływ przez parownik jest w zasadzie wymuszony przez pompę obiegową. Stąd nazwa obiegu wymuszonego. W istocie jednak nie ma różnic między obiegiem wspomaganym i wymuszonym, wobec czego dla doboru parametrów konstrukcyjnych i przepływowych parowników obu typów kotłów stosuje się te same kryteria jakościowe.

Kontur cyrkulacyjny kotła z obiegiem wspomaganym lub wymuszonym (oprócz konturów cyrkulacyjnych kotłów typu La Monta) jest w zasadzie identyczny lub bardzo zbliżony (może być bardziej złożony geometrycznie, rury ekranowe mogą mieć mniejsze średnice) do klasycznego konturu kotła z obiegiem

naturalnym. Zasadniczą różnicę stanowi zainstalowanie w układzie opadowym pomp przewalowych, pokonujących dodatkowo i zwiększone opory przepływu w konturze, zapewniających dostateczną stabilność przepływu w rurach parownika oraz utrzymujących strumień masy czynnika i krotkość cyrkulacji na określonym poziomie we wszystkich warunkach pracy kotła. Podstawowy parametr przepływowy parownika: żądany i z góry założony rozptyw wody na poszczególne rury lub grupy rur wznoszących, wyodrębnione jako oddzielne kontury cyrkulacyjne, uzyskuje się przez zróżnicowane kryzowanie (dodatkowe opory przepływu) na wlocie do rur (grup rur) wznoszących, tworzących te kontury. Układ cyrkulacyjny, złożony w ogólnym przypadku z systemu rur opadowych, pomp obiegowych z przewodami ssącymi, tłocznymi i armaturą rur wznoszących, połączonych dolnymi i górnymi komorami zbiorczymi, systemu rur odprowadzających mieszankę parowodną do walczaka lub wodooddzielacza oraz urządzeń separacyjnych - stanowi rozgałęzioną sieć hydrauliczną, w której dodatkową komplikację stanowi mechanizm napędowy czynnika: nakładające się działanie wspomagające lub wymuszające przepływ pomp obiegowych z siłą naturalnego wyporu różną dla poszczególnych konturów cyrkulacyjnych. Zapewnienie prawidłowego obiegu wody we wszystkich konturach cyrkulacyjnych w całym zakresie warunków pracy kotła (zmienne obciążenie cieplne i jego rozkład w komorze paleniskowej, ciśnienie robocze, temperatura wody zasila-jącej), wymaga ustalenia i spełnienia właściwych kryteriów doboru parametrów konstrukcyjnych i przepływowych układu cyrkulacyjnego, a mianowicie:

- kryterium minimalnego strumienia masy w rurach wznoszących;
- kryterium maksymalnego stopnia suchości pary na wylocie z rur wznoszących;
- kryterium stabilności przepływu.

Dwa pierwsze kryteria pozwalają na ustalenie średniej krotkości cyrkulacji dla całego parownika oraz określenie rozptyłów czynnika na poszczególne kontury cyrkulacyjne przy znamionowym obciążeniu kotła, co z kolei pozwala na wyznaczenie wielkości oporów kryz dławiących na wlocie do konturów. Kryterium trzecie pozwala na wyznaczenie dodatkowych oporów kryz, zapewniających stabilność przepływu czynnika.

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie układ cyrkulacyjny parownika kotła ze wspomaganą lub wymuszoną cyrkulacją.

Układ składa się z i grup konturów, w każdej grupie występuje k konturów cyrkulacyjnych. Sumaryczny strumień czynnika G_w dzieli się na strumienie w poszczególnych konturach G_k . Dla wyznaczenia strumieni czynnika G_k korzysta się z dwu pierwszych warunków kryterialnych:

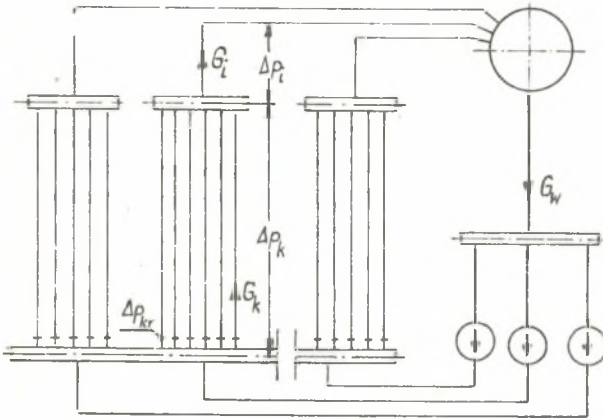
$$(w\varrho) \geq (w\varrho)_{\min}$$

oraz

$$\frac{D_k}{G_k} = x_k \leq x_{\max}$$

gdzie:

- $w\dot{Q}$ - strumień masy,
- D - strumień produkowanej pary,
- x - stopień suchości pary.



Rys. 1. Schemat układu cyrkulacyjnego kotła ze wspomaganą lub wymuszoną cyrkulacją

Minimalny strumień masy określa się z warunku dostatecznego chłodzenia rur ekranowych. Maksymalny stopień suchości pary na wylocie z konturu w skrajnym przypadku może wynosić 1 (całkowite odparowanie wody), w rzeczywistości, aby nie dopuścić do przegrzania pary $x_{\max} < 1$.

Sumaryczny strumień wody cyrkulacyjnej

$$G_w = \sum G_k,$$

zaś średnia krotność cyrkulacji wynosi

$$c = \frac{G_w}{D},$$

gdzie:

D - całkowity strumień pary produkowanej w parowniku.

Wielkość G_w jest podstawą do doboru wydajności pompy lub zespołu pomp obiegowych.

Ustalenie wielkości strumieni czynnika G_k w poszczególnych konturach cyrkulacyjnych pozwala na wyznaczenie ogólnie pojętych oporów przepływu w konturach $\Delta p_k = f(G_k)$ i przewodach odprowadzających $\Delta p_i = f(G_i)$, przy czym strumień G_i jest sumą strumieni G_k w konturach tworzących grupę i . Właściwość sieci hydraulicznej stanowiąca o tym, że opory przepływu czyn-

nika w jej gałęziach połączonych na wlocie i wylocie są równe jest podstawą do wyznaczenia oporów przepływu kryz dławiających $\Delta p_{kr w}$, które zapewnia żądany rozkład strumieni G_k we wszystkich konturach cyrkulacyjnych kotła. Jest to tzw. kryzowanie wyrównawcze kotła.

Po ustaleniu wielkości kryzowania wyrównawczego przy znamionowym obciążeniu kotła sporządza się ogólną charakterystyki przepływowe konturów cyrkulacyjnych $\Delta p_k = f(G)$ i sprawdza kryterium stabilności przepływu. W razie wystąpienia przepływów niestabilnych wyznacza się dodatkową wielkość oporu kryz $\Delta p_{kr s}$ (tzw. kryzowanie stabilizujące), o którą zwiększa się opory kryz we wszystkich konturach cyrkulacyjnych. W ten sposób uzyskuje się drugi podstawowy parametr konieczny do doboru pomp obiegowych a mianowicie minimalną wysokość podnoszenia (po uwzględnieniu oporów przepływu w układzie opadowym). Jeżeli wysokość podnoszenia pomp przewidzianych do układu cyrkulacyjnego jest większa od sumy oporów przepływu w całym układzie, należy zwiększyć opory kryz o dodatkową wielkość $\Delta p_{kr p}$, aby punkt pracy pomp odpowiadał optymalnemu punktowi charakterystyki.

Jednym z podstawowych problemów przy obliczaniu wspomaganego i wymuszonego obiegu wody jest znalezienie rozkładu przepływu czynnika w poszczególnych konturach w statycznie zmiennych warunkach pracy kotła, tzn. w przypadku, gdy podstawowe parametry cieplno-przepływowe obiegu są różne od tych, które przyjęto za znamionowe przy ustalaniu wielkości oporów kryz. Zmianie uleg może sumaryczny strumień wody cyrkulacyjnej G_w na skutek pracy pomp obiegowych przy zmienionej charakterystyce odbioru, ilość i rozkład przejmowanego przez parownik ciepła, ciśnienie robocze i temperatura wody zasilającej. Geometria układu jest już całkowicie zdeterminowana, a tym samym nie istnieje już wolny parametr, jakim przy obliczeniu warunków znamionowych był opór kryzy Δp_{kr} , który zapewniał uzyskanie założonych przepływów G_k . Po zakryzowaniu kotła w toku obliczeń wielkości strumieni w poszczególnych konturach G_k i w grupach konturów G_i występują jako niewiadome, których bezpośrednie określenie nie jest możliwe. Rozwiązanie zadania otrzymać można różnymi metodami; iteracyjną, gradientową itp. W wyniku otrzymuje się pełne charakterystyki przepływowe konturów cyrkulacyjnych przy wszystkich przewidywanych warunkach pracy kotła (w tym również przy ciśnieniu poślizgowym). Istnieje więc możliwość stwierdzenia, czy we wszystkich warunkach obieg spełnia warunki kryterialne i wniesienia odpowiednich korekt zarówno w kryzowaniu kotła jak i doborze wydajności pomp obiegowych.

Charakterystyki przepływowe konturów cyrkulacyjnych parownika, wyznaczone dla wszystkich przewidywanych warunków pracy, są podstawą do ostatecznego doboru i określenia optymalnego sposobu eksploatacji pomp obiegowych. Kotły bezwalczakowe z wymuszoną cyrkulacją, w których krotność obiegu wynosi 1,5, w układzie opadowym zainstalowaną mają z reguły jedną pompę, druga pozostaje w rezerwie. Pompa musi zapewnić określony wydatek i wysokość podnoszenia i pracuje w sposób ciągły w całym lub częściowym

zakresie obciążeń kotła. Z tego powodu ani jej dobór, ani sposób eksploatacji nie stanowią większego problemu.

W przypadku kotłów z cyrkulacją wspomaganą dobór i określenie warunków pracy pomp obiegowych staje się problemem o podstawowym znaczeniu. W kotłach tych ze względu na krotkość cyrkulacji rzędu 3-4 natężenie przepływu wody cyrkulacyjnej jest bardzo duże, co powoduje konieczność zainstalowania w układzie opadowym całego zespołu pomp pracujących równolegle. Są to pompy specjalne, umieszczone zazwyczaj wewnątrz centralnych rur opadowych, jednostopniowe, odśrodkowe, o wyróżniku szybkobieżności n_{SQ} w granicach 60-100 i wysokości podnoszenia w obszarze maksymalnej sprawności wynoszącej 0,3-0,4 MPa. Stosowane obecnie rozwiązanie konstrukcyjne tego typu pomp nie przewidują możliwości regulacji ich wydajności, zmiana natężenia przepływu wody cyrkulacyjnej odbywać się może jedynie skokowo przez włączanie lub wyłączanie poszczególnych jednostek. Konieczna jest więc szczegółowa analiza pracy zespołu pomp w różnych warunkach eksploatacyjnych kotła, która pozwoliłaby na określenie właściwych momentów włączania i wyłączania pomp, a co za tym idzie ograniczyła koszty eksploatacyjne kotła. Ponadto niezbędne jest ustalenie dopuszczalnych obszarów obciążeń kotła dla wszystkich możliwych warunków współpracy z pompami obiegowymi, a tym samym sprecyzowanie zakresów dopuszczalnych obciążeń kotła w przypadku wypadnięcia z pracy jednej lub kilku zainstalowanych w zespole pomp.

Analiza tego typu dokonywana jest przy pomocy powiązania charakterystyk przepływowych konturów cyrkulacyjnych z charakterystykami zespołu pomp dla całego przewidywanego zakresu współpracy, przy czym za podstawę analizy służą przedstawione uprzednio kryteria: minimalnego strumienia masy, maksymalnego stopnia suchości pary i stabilności przepływu.

Założenie krzywych charakterystycznych pomp do analizy układu cyrkulacyjnego może zostać dokonane tylko w oparciu o dane dotyczące konkretnej konstrukcji, która została przebadana na stacji prób. Jedyną drogą jest tu korzystanie z materiałów katalogowych lub ofertowych, odnoszących się do jednostek o zbliżonych parametrach technicznych, głównie zaś o zbliżonym wyróżniku szybkobieżności, który precyzuje ściśle typ pompy (kształt wirnika). Ostateczny dobór pomp nastąpić może spośród jednostek oferowanych przez wytwórnie pompowe, lub też można zamówić wykonanie pomp o określonej charakterystyce i parametrach nominalnych. Wymaganiom stawianym przy tego typu zamówieniach sprostać mogą jedynie producenci, dysponujący odpowiednimi stanowiskami badawczymi.

W przypadku możliwości doboru zespołu pomp obiegowych spośród różnych jednostek różniących się charakterystykami pracy, lub zamówienia pomp o konkretnej charakterystyce, możliwe jest przeprowadzenie analizy prowadzącej do wyboru optymalnego zespołu pompowego. Analiza taka może być przeprowadzona jedynie w oparciu o dodatkowe informacje dotyczące sposobu prowadzenia bloku, w którym kocioł ma być zainstalowany, tzn. w oparciu o uporządkowany wykres obciążeń. Prowadzone wariantowo obliczenia dla wszyst-

kich rozpatrywanych zespołów pomp (z uwzględnieniem obszarów pracy kotła z wyłączonymi pompami) prowadzą do wyboru zespołu optymalnego, przy którym suma kosztów stałych i zmiennych osiąga minimum.

Analiza układu przepływowego parownika może być również podstawą do kompleksowej optymalizacji tego zespołu kotła, prowadzącej do wyboru optymalnych średnic rur wznoszących, ich podziałek, średnic przewodów łączących itp. Obliczenia przepływowe muszą być w tym przypadku połączone z obliczeniami cieplnymi, w szczególności zaś uwzględniać muszą rozkład temperatur w elementach ekranu membranowego.

КРИТЕРИЯ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИСПАРИТЕЛЕЙ КОТЛОВ С ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ И ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ
РАБОТАЮЩИХ КАК В ПОСТОЯННОМ, ТАК И В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМАХ

R e z y m e

Представлено критерия выбора основных параметров вспомоществованной и принудительной циркуляции в паровых котлах. Эти критерия: минимального расхода массы, минимальной влажности пара и стабилизации течения ведут к установлению величины потерей давления в воротниках на входе подъемные трубы. Определение гидравлических характеристик циркуляционных контуров позволяет избрать циркуляционные насосы и установить оптимальную методу эксплуатации насосов в переменном режиме работы котла.

THE CRITERIA FOR PREDICTION OF BASIC AND FLOW
PARAMETERS OF THE BOILER EVAPORATORS WITH ASSISTED
AND FORCED CIRCULATION OPERATING AT BASIC AND
VARIABLE CONDITIONS

S u m m a r y

Criteria of selection of the basic parameters of assisted and forced circulation in steam boilers was described. These criteria: the minimum mass flow, the maximum vapour quality and the flow stability, lead to determination of pressure drop in orifices installed in evaporator tube inlets. Calculation of circulating contours flow characteristics permits to select circulating pumps and to define their optimum method of exploitation under variable conditions of boiler operation.