

Stefan PERYCZ

Politechnika Gdańska

NIEKTÓRE PROBLEMY ROZWOJU TURBIN PAROWYCH WIELKIEJ MOCY

Streszczenie. Na tle perspektyw rozwoju energetyki w okresie do roku 2000 omówiono wybrane problemy budowy turbin parowych wielkiej mocy: zwiększanie mocy jednostkowej przy zachowaniu bezpieczeństwa i niezawodności ruchowej na niezmiennym poziomie, poprawianie zdolności manewrowych, rozwój turbin parowych podszczytowych, niektóre aspekty budowy turbin dla siłowni jądrowych. Wskazano na problemy badawcze związane z optymalizacją nowych maszyn.

1. Problemy bilansu paliwowo-energetycznego

Kilka lat temu opublikowany został tzw. Raport rzymski Meadowsa wskazujący, że przy utrzymaniu obecnego tempa rozwoju przemysłu ludzkość szybko wyczerpie możliwości tej planety, co musi doprowadzić do katastrofalnych następstw w postaci załamania cywilizacji.

Kryzys naftowy z roku 1973, który nastąpił wkrótce po ogłoszeniu Raportu rzymskiego, oznaczał wstrząs dla opinii publicznej zaczynającej się dowiadywać, iż zasoby paliw i w ogóle surowców na ziemi nie są nieograniczone i trzeba nimi rozsądnie gospodarować.

Jak wiadomo z różnych oszacowań, zapas energii w paliwach konwencjonalnych (węgiel, ropa, gaz) i jądrowych - sumarycznie - starczyłoby przy dzisiejszym zapotrzebowaniu na około 1800 lat. Inaczej się sprawa kształtuje, jeżeli rozważymy utrzymanie dotychczasowego tempa rozwoju spożycia energii. Zakładając podwojenie co 10 lat, otrzymujemy za 100 lat $2^{10} = 1024$ razy większe zużycie roczne niż obecnie. Przy takim tempie paliwa konwencjonalne starczyłoby zaledwie na około 90 lat, zaś sumaryczne zasoby paliw konwencjonalnych i jądrowych zostałyby wyczerpane za 100 lat.

Taka kalkulacja wydaje się wyraźnie wskazywać na rangę problemu. Byłoby jednak nierozsądne zakładać, że zużycie energii będzie równomiernie wznosić wykładniczo, raczej należy oczekiwać pewnego nasycenia. Niektórzy autorzy oceniają, że radykalny wzrost cen paliw spowoduje regres, zmniejszenie spożycia i obniżenie tempa rozwoju gospodarczego, zwłaszcza w krajach najsilniej uprzemysłowionych, pochłaniających obecnie większość zasobów surowcowych.

W tej sytuacji paliwowo-surowcowej świata kapitalne znaczenie mają poszukiwania nowych źródeł energii i nowych metod jej przetwarzania. Naj-

większe nadzieje na generalne rozwiązanie trudności energetycznych rokuje fuzja jądrowa. Szereg prognoz przewiduje uruchomienie pilotowych elektrowni za 25-30 lat, tj. na przełomie XX i XXI wieku. Energię elektryczną na skalę przemysłową będzie można produkować tą metodą od ok. 2100 r. Oznaczałoby to radykalne zlikwidowanie deficytu paliw elektrowniowych. Prąd z takich elektrowni nuklearnych można by zastosować m.in. do otrzymywania wodoru i wody metodą elektrolityczną bądź termiczną [21]. Gaz ten służyłby z kolei jako paliwo do silników trakcyjnych (samochody, samoloty, okręty), co uniezależniłoby komunikację od ropy naftowej, gazu naturalnego i węgla.

Stosowanie wodoru, otrzymywanego z wody i spalającego się na wodę, byłoby idealną metodą z punktu widzenia ochrony środowiska, pozostawiając nierozwiązany problem obciążenia cieplnego atmosfery.

Zanim - za około 100 lat - skończą się kłopoty energetyczne, musimy przeżyć trudny okres przejściowy, w którym narastać będzie deficyt paliwowy, stanowiąc jeden z hamulców rozwoju gospodarczego naszej planety.

Ograniczmy nasze dalsze rozważania do bliższego horyzontu czasowego, do roku 1990-2000, pomijając tym samym zagadnienia futurologii. Główne problemy energetyki w tym okresie związane są z narastającymi trudnościami bilansu paliwowego.

Błędem byłoby sądzić, że zadania naukowo-rozwojowe najbliższych 15-20 lat powinny się koncentrować wyłącznie lub głównie na tzw. metodach niekonwencjonalnych (energia słoneczna, geotermiczna, energia wiatru itd.), gdyż jakoby - układy "konwencjonalne" obejmujące siłownie na paliwo chemiczne i jądrowe nie mają już pilnych, ważnych i trudnych problemów [8].

Wiele analiz wskazuje, że poprawienie sprawności użytkowania energii i oszczędność spożycia kryją w sobie wielkie rezerwy [16]. Jednak, jak dotychczas, mimo podejmowanych wysiłków w celu przydławienia przyrostu zużycia energii elektrycznej, rośnie ono nadal. Wyrównanie podaży i popytu wymaga więc dalszych poważnych inwestycji.

Na tle sytuacji światowej warto wskazać na plany rozwoju energetyki polskiej. Z uwagi na długi cykl budowy elektrowni, wynoszący około 6 lat od ustalenia lokalizacji (a 7-10 lat od daty decyzji) do uruchomienia pierwszego bloku, energetyka nasza posiada już obecnie szczegółowy plan na najbliższe pięcioletki oraz lokalizacje do 1990 r. Tak więc prognozy do r. 1990 można ocenić jako dość pewne, jakkolwiek wskaźniki mogą ulec pewnej korekcie.

Przewidywane zużycie energii wynosi [2], [18]:

rok 1975	-	98 TWh/rok
1980	-	135 (145) TWh/rok
1990	-	250 (300-350) TWh/rok.

W r. 1990 moc zainstalowana wynosić będzie 50-60 GW, osiągając w przybliżeniu obecny stan energetyki angielskiej. Przeciętne przyrosty mocy wyniosą ponad 2000 MW rocznie w następnej pięcioletce i ponad 3000 MW rocznie w okresie 1986-1990.

Włączenie tak wielkich mocy wymaga silnego i dostatecznie wczesnego wzrostu mocy produkcyjnej krajowego przemysłu urządzeń energetycznych (kotły, turbiny, generatory, transformatory, automatyka itd.). Konieczne jest wprowadzenie większych bloków zamiast obecnie produkowanych jednostek 200 MW i 360 MW, dogodniejszych inwestycyjnie, o lepszych wskaźnikach techniczno-ekonomicznych.

2. Cechy konstrukcyjne współczesnych turbin parowych wielkiej mocy

Turbiny parowe stanowią obecnie i zapewne długo jeszcze pozostaną podstawowymi silnikami stosowanymi w elektrowniach. Rozwój tych maszyn cechuje się zwiększaniem mocy jednostkowej z zachowaniem dobrej niezawodności przy jednocześnie wzrastających wymaganiach stawianych zdolnościom manewrowym bloków energetycznych.

W ostatnich latach wykształcił się, jak się wydaje, wzorcowy model turbiny dużej mocy dla siłowni na paliwo chemiczne. Jest to maszyna normalno-obrotowa (50-60 obr./s), jednowałowa, wielokadłubowa, złożona z cylindra WP, cylindra SP i kilku cylindrów NP, z tym że ogólna liczba cylindrów nie przekracza 4-5.

Niezawodność ruchowa i wymagania manewrowe przemawiają za uproszczeniem schematu cieplnego. Na ogół pierwszy zaczep regeneracyjny umieszcza się obecnie poza korpusem WP, co upraszcza jego konstrukcję. Ustępstwo to wiąże się z pewną obniżką sprawności obiegu.

Korpus wewnętrzny WP wykonywany jest często bez kołnierzy, według konstrukcji "garnkowej" KWU [4] lub z pierścieniami skurcznymi wg BBC [14]; takie rozwiązanie zmniejsza naprężenia termiczne w ściankach. Temu samemu celowi służy stosowanie szlachetniejszych materiałów i wprowadzenie, jako nowości, ulepszenia cieplnego korpusów - co pozwala na zmniejszenie grubości ścianek a przez to na redukcję gradientów temperatury.

Korpus dwuściankowy spotykamy obecnie również w cylindrze SP; poprawia to zdolności manewrowe. Obserwuje się coraz powszechniejsze stosowanie chłodzenia najgorętszych miejsc, zwłaszcza wirnika SP.

Coraz konsekwentniej obowiązuje zasada "jedno łożysko między korpusami" zapewniająca bezwibracyjną pracę turbozespołu mimo deformacji korpusów i fundamentów. Sprawa ta wiąże się z rozwojem nowych typów łożysk promieniowych [5].

Łożysko osiowe zachowuje niezmienną, typową konstrukcję klockową.

Niektóre firmy [14] stosują stojaki łożyskowe nieruchome, rozwiązanie to sprzyja spokojnej pracy maszyny w zmiennych warunkach ruchu.

Dławnice zewnętrzne NP mocuje się obecnie nie do korpusów, które przy wielkich wymiarach ulegają znacznym odkształceniom, ale do stojaków łożyskowych. Ta nowa koncepcja konstrukcyjna pozwala na zachowanie lepszej centryczności wału w dławnicy, zmniejszenie przecieków i poprawienie niezawodności ruchu.

Łopatki wirnikowe, a także łopatki kierownicze, wykonuje się najczęściej jako integralne, unikając ich bandażowania i nitowania. Zabieg nitowania, stanowiący dotychczas standardową technologię, daje mało sprawdzalny stan układu łopatkowego i bywa przyczyną licznych uszkodzeń. Konstrukcja integralna, jakkolwiek droższa, jest uzasadniona ekonomicznie w zastosowaniu do turbin dużej mocy, zwiększając ich niezawodność.

Łopatki ostatnich stopni robi się coraz częściej jako swobodne - bez bandaży czy drutów usztywniających; upraszcza to model dynamiczny i pozwala dokładniej obliczyć częstotliwości własne.

Turbiny dla elektrowni konwencjonalnych projektuje się z reguły jako normalnoobrotowe, 50-60 obr./s. W siłowniach jądrowych spotykamy zarówno prędkości normalne jak i "połówkowe", 25-30 obr./s. Poglądy różnych firm na tę sprawę są płynne. W USA stosuje się powyżej 300 MW turbiny wolnoobrotowe, podobnie w Anglii, Francji i Japonii. W ZSRR buduje się turbiny normalnoobrotowe do 750 MW i przygotowuje produkcję jednostek 1000 MW i 2000 MW wolnoobrotowych [8]. Znane firmy zachodnie BBC i KWU budują turbiny jądrowe zarówno normalno- jak i wolnoobrotowe. Większość turbin nuklearnych KWU w obszarze 600-1300 MW to maszyny wolnoobrotowe, w tym znana turbina dla elektrowni Biblis. Jednak sporo projektowanych turbin o mocy 700, 750, 970 i 1047 MW (dla siłowni Trillo w Hiszpanii) otrzyma prędkość 50 obr./s. Jeszcze większą turbinę normalnoobrotową projektuje BBC dla siłowni Graben w Szwajcarii [12]. Turbina ta, o mocy 1200 MW, jednowałowa, której uruchomienie przewidziano na r. 1983, będzie rekordowa w skali światowej.

Przyjęcie prędkości połówkowej zamiast normalnej pozwala, przy założeniu tych samych naprężeń w ostatnim stopniu, zwiększyć powierzchnię wylotową 4 razy, tzn. zwiększyć moc graniczną 4 razy. Jeżeli więc można już obecnie zbudować turbinę konwencjonalną normalnoobrotową o mocy 1200 a nawet 2000 MW [3], [17], to przejście na obroty połówkowe umożliwiłoby realizację jednostki 4800-8000 MW w siłowni konwencjonalnej i 2800-4500 MW w siłowni jądrowej. Na tak duże maszyny nie ma obecnie zapotrzebowania.

Maszyny wolnoobrotowe kosztują drożej, w zamian pozwalają obniżyć stratę wylotową i podnieść sprawność wewnętrzną. Ta sprawa była wielokrotnie analizowana. Według danych radzieckich [19] zysk sprawności wynosi 1-1,7% natomiast BBC podaje [3] ok. 0,5-1%.

Jednakże zalety turbin normalnoobrotowych przeważają i gdyby udało się pokonać trudności techniczne, przyszłe turbiny nuklearne wielkiej mocy budowano by zapewne jako normalnoobrotowe. Taką tezę lansują główne firmy europejskie [13].

Zwiększeniu zdolności manewrowych turbin i bloków sprzyja - oprócz omówionych zabiegów konstrukcyjnych - wprowadzenie automatycznej kontroli procesów rozruchu i obciążenia turbiny, przy czym w skład wielkości sterujących wchodzi gradienty temperatury w krytycznych miejscach maszyny.

Pozwala to na manewry z optymalnie dobraną szybkością, wykorzystującą możliwości materiałowe, ale nie powodującą nadmiernych przeciążeń.

3. Problemy badawcze w technice turbinowej

Im bardziej dojrzały technicznie jest produkt, tym większych wysiłków wymaga drobne nawet jego ulepszenie.

Rozwój turbin parowych osiągnął obecnie taki stan, że poprawianie wskaźników musi opierać się na coraz głębszych badaniach podstawowych, produkcyjnych i eksploatacyjnych, na stosowaniu coraz doskonalszych i subtelniejszych metod obliczania i projektowania.

Syntetyczne kryterium jakości turbozespołu względnie bloku energetycznego stanowi jego ekonomiczność rozumiana globalnie, tj. obejmująca zarówno zużycie paliwa, jak też koszty paliwa wiążące się z ceną paliwa konkretnego typu, koszty inwestycyjne oraz koszty związane z obsługą bieżącą, remontami, przestojami itp. koszty związane z ogólnie pojętymi własnościami manewrowymi i niezawodnością bloku.

Sprawność cieplna siłowni, zużycie jednostkowe paliwa są tylko jednym z elementów wpływających na efektywny koszt produkcji energii elektrycznej.

Optymalizacja bloku z uwagi na minimum kosztu i kWh określa kierunki rozwojowe w budowie turbin parowych:

- 1) zwiększenie mocy jednostkowej,
- 2) poprawianie zdolności manewrowych,
- 3) rozwój turbin szczytowych i pedaszczytowych,
- 4) problemy specjalne turbin dla siłowni jądrowych.

Problemem nr 1 pozostaje od kilkunastu lat sprawa zwiększania mocy jednostkowej turbin. Główne korzyści polegają na obniżeniu kosztów jednostkowych, zmniejszeniu zapotrzebowania personelu i obniżeniu zużycia paliwa. Tak np. zwiększenie mocy bloku z 300 MW na 600 MW pozwala zaoszczędzić ok. 15% na inwestycji, 10-25% na powierzchni zajmowanej przez blok. Warto też pamiętać, że czas budowy bloku 300 lub 600 MW nie różni się wyraźnie i wynosi 40-45 miesięcy. Z punktu widzenia produkcji turbin główną zaletą jest zmniejszenie pracochłonności na wyprodukowany megawat i możliwość zwiększenia produkcji na tej samej powierzchni roboczej.

3.1. Moc progowa

Jednym z istotnych czynników ograniczających możliwość zwiększania mocy jednostkowej jest tzw. moc progowa wirnika wysokoprężnego. Zagadnienie to było do niedawna całkowicie nieznanne, chociaż obserwowano sporadycznie zjawisko niestabilności wirnika zależne od obciążenia, zwłaszcza w turbinach parowych wysokoprężnych i turbinach gazowych lotniczych.

Wstępne wyjaśnienie teoretyczne podali po raz pierwszy Thomas w r. 1958 [20] i Alford w r. 1965 [1]. Pod wpływem wymuszeń aerodynamicznych w układzie łopatkowym bądź w uszczelnieniach labiryntowych wirniki wysokoprężne wykazują skłonność do drgań samowzbudnych, pojawiających się po przekroczeniu określonego obciążenia, zwanego "mocą progową". Opanowanie niestabilności aerodynamicznej wirników wymaga poznania odpowiednich zasad konstrukcji części przepływowej. Problem ten jest współcześnie bardzo intensywnie badany [7], [15], [20].

3.2. Moc graniczna

Wymiary ostatniego stopnia turbiny kondensacyjnej od dłuższego czasu stanowią parametr limitujący maksymalną przelotność turbiny. Z równania ciągłości (uproszczonego) $m = A v/c$ wynika możliwość realizacji dużego natężenia przepływu m poprzez: 1) zwiększenie powierzchni wylotu $A = \pi d l$, 2) zwiększenie końcowej objętości właściwej v , tj. pogorszenie próżni, 3) zwiększenie prędkości wylotowej c , czyli dopuszczenie dużej straty wylotowej. Ograniczając się do pierwszego składnika zauważmy, że naprężenia rozrywające w łopatkach od własnej siły ośrodkowej rosną proporcjonalnie do wartości powierzchni A . Dla prędkości obrotowej 50 obr./s i łopatek ścienionych wykonanych ze stali, w przybliżeniu

$$\sigma \approx 50 \cdot A \text{ [MPa]}$$

Przy powierzchni 8-9 m² naprężenia dochodzą do 400-450 MPa, co jest uważane za niemal szczytowe osiągnięcie techniki, nie tylko turbinowej. Wyprodukowanie specjalnych gatunków stali łopatkowych o wysokich wskaźnikach wytrzymałościowych pozwoli zapewne podnieść tę granicę do 10-11 m², co, jak się wydaje, stanowić będzie w najbliższym okresie kres możliwości.

Zastosowanie stopów tytanu, materiału o gęstości niemal dwukrotnie mniejszej od stali (4,5:7,8) a jednocześnie wyższej wytrzymałości, umożliwia już obecnie zrealizować powierzchnię ok. 12 m² przy $n = 50$ obr./s. Turbina radziecka 1200/1440 MW firmy LMZ [17] posiada wylot 66 m² przy trzech dwustrumieniowych cylindrach NP. Powierzchnia jednego wylotu $A = 11$ m², wymiary stopnia $1/d = 1200/2900$ mm. Prototyp tej turbiny przechodzi właśnie badania wstępne. Ten sam wylot 11 m² z łopatkami tytanowymi zamierza się zastosować w jednowałowej, normalnoobrotowej turbinie 2000 MW [17]. Wspomniana już turbina nuklearna firmy BBC dla elektrowni Graben mieć będzie jeszcze większą powierzchnię wylotu $A = 12,25$ m², $1/d = 1200/3200$ mm.

Podstawowe znaczenie mają również granice wytrzymałości wirnika. Udział siły odśrodkowej od łopatek stanowi do 35% obciążenia tarczy wirnikowej. Dobór na łopatki materiału o mniejszej gęstości pozwala na zredukowanie naprężeń w tarczy. Stopy tytanu są więc perspektywiczne nie tylko ze względu na wytrzymałość łopatek.

Z mocą graniczną wiążą się problemy aerodynamicznego kształtowania łopatek w warunkach przepływu naddźwiękowego, problemy niestabilności przepływu zwłaszcza przy obciążeniach częściowych jak również konieczność precyzyjnego obliczania trójwymiarowego stanu naprężeń w łopatkach i wirniku oraz coraz dokładniejszego przewidywania częstości drgań własnych łopatek.

Wzrost mocy jednostkowej niesie ze sobą przesunięcie punktu ciężkości w poszczególnych - w zasadzie znanych - problemach.

Dla przykładu wskażemy na kilka z nich.

1. Utrzymanie zasady, "jedno łożysko między korpusami" przestaje być osiągalne przy stosowaniu tradycyjnego kształtu panwi (przykład turbina 1300 MW dla Biblis) i wymaga rozwoju nowego typu łożysk wahliwych dostosowanych do olbrzymich sił i prędkości obwodowych [5]. Konstrukcje te są w pełnym rozwoju, wymagają jeszcze wielu badań zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych oraz nowych technologii.

2. W maszynach niewielkiej mocy (poniżej ok. 100 MW) wpływ podatności łożysk na prędkości krytyczne jest stosunkowo niewielki, tak że nieraz założenie idealnie sztywnego podparcia lub niezbyt dokładna ocena podatności łożyskowania nie prowadziły do znaczących błędów. Obecnie - ze wzrostem wymiarów wirników i wzrostem obciążenia łożysk - sytuacja się odwróciła. Wzrasta znaczenie dokładnego określenia podatności klina olejowego i stojaka z uwzględnieniem anizotropowości podparcia. Powstał więc jakościowo nowy problem wymagający nowego podejścia badawczego i nowych zasad konstruowania linii wału.

3. Wymagania dotyczące obliczeń wytrzymałościowych, zwłaszcza wirnika i korpusu, zaostrzają się znacznie, gdyż z konieczności musi się przyjmować coraz mniejsze współczynniki bezpieczeństwa. Obliczenia muszą być coraz bardziej precyzyjne i możliwie dokładnie uwzględniać warunki brzegowe do naprężeń termicznych z włączeniem problemu małowyciskowego zmęczenia.

3.3. Zdolności manewrowe

Jedną z cech charakterystycznych współczesnej energetyki są rosnące wymagania manewrowe stawiane nowo instalowanym blokom dużej mocy [8], [11]. W porównaniu z maszynami ruchu podstawowego, pracującymi - w zasadzie - bez przerwy w czasie całego okresu międzyremontowanego obecnie budowane turbiny elektryczne, zwłaszcza konwencjonalne, muszą być przystosowane do pracy podszczytowej, tj. do ruchu przerywanego z odstawieniem cotygodniowym a nawet do ruchu dwuzmianowego, z otrzymywaniem na „okres doliny nocnej. Dla turbin podszczytowych zakłada się ok. 7500 uruchomień ze stanu gorącego (po postoju nocnym) i 1500 uruchomień ze stanu ciepłego w ciągu 30 lat pracy.

Głównym parametrem ograniczającym zdolności manewrowe są periodyczne zmiany temperatur powodujące proces małowyciskowego zmęczenia materiału. Zagadnienie to jest niezmiernie aktualne i wszystkie poważne ośrodki naukowo-techniczne branży turbinowej intensywnie się nim zajmują. Sprowadza

się ono nie tylko do problemu materiałowego, ale też do opracowania zasad projektowania i metodyki eksploatacji turbin podszczytowych. W zasadzie winno się dążyć do takiej konstrukcji, aby [11]:

- 1) zmniejszyć intensywność wymiany ciepła między parą a metalem,
- 2) zmniejszyć poziom temperatur w najgorętszych miejscach turbiny WP i SP,
- 3) ograniczyć szybkość ostygnięcia gorących elementów.

Duże efekty można osiągnąć stosując ruch poślizgowy, racjonalną konstrukcję cylindrów oraz chłodzenie wirników.

Wprowadzenie częstych odstawień i uruchomień stwarza nowe problemy wytrzymałościowe. Ruch przerywany jest nie bez znaczenia dla wytrzymałości łopatek wirnikowych, zwłaszcza najsilniej obciążonych łopatek ostatniego stopnia. Do niedawna traktowano obciążenie od siły odśrodkowej jako obciążenie stałe i dla takiego modelu dobierano materiał i współczynniki bezpieczeństwa. Wielokrotne odciążanie łopatek przy pracy dwuzmianowej pogarsza wyraźnie warunki pracy, obniża ich wytrzymałość, zmusza do przyjmowania większego współczynnika bezpieczeństwa.

3.4. Niektóre problemy turbin jądrowych

Ze wzrostem cen paliw konwencjonalnych wzrasta konkurencyjność siłowni jądrowych. Ekonomiczne uzasadnienie stosowania energetyki jądrowej nie jest bynajmniej jednoznaczne. Ocenia się np., że w USA w latach 1984-1990 energia produkowana w siłowniach jądrowych podrożeje aż 5-krotnie w porównaniu z okresem 1969-1975. Koszty inwestycyjne siłowni wodno-ciepłowniczych o mocy bloku 1000 MW wzrosną z 226 dol/kW (rok 1969) do 886 dol/kW w roku 1984. Oczekuje się też wzrostu cen uranu w tym okresie od 7,5 do 45 dol/kg.

Oprócz niepewnych prognoz ekonomicznych obserwuje się opory natury politycznej w związku z możliwościami rozprzestrzenienia broni jądrowej. Ponadto możliwości nieprzewidzianych ujemnych skutków związanych ze składowaniem wielkiej ilości odpadów radioaktywnych wywołują zaniepokojenie opinii publicznej.

Tym niemniej rozwój energetyki jądrowej wydaje się niezbędny zwłaszcza w krajach o ujemnym bilansie paliwowym.

Według [10] reaktory na neutronach termicznych będą stanowiły do roku 1990 około 99% wszystkich reaktorów, z tego lekkowodne PWR i BWR - ponad 80%. Typowym obiegiem siłowni jądrowej pozostanie więc dość długo obieg na parę nasyconą lub lekko przegrzaną o ciśnieniu 4-7 MPa.

Turbiny takich siłowni mają mały spadek entalpii i duże jednostkowe zużycie pary, posiadają więc mniej stopni niż maszyny konwencjonalne, ale znacznie większe gabaryty poprzeczne przy tej samej mocy. Stawia to ostro sprawę doboru prędkości obrotowej (omówionej w rozdziale 2).

Jednym z charakterystycznych problemów tych turbin jest ochrona przed erozją i to zarówno w kadłubie NP jak i WP.

Parametry pary produkowanej w wytwornicach siłowni lekkowodnej są niskie i zapewniają sprawność ogólną siłowni w najlepszym przypadku 33-34%,

znacznie niższą niż w siłowniach konwencjonalnych (40-44%). Z tego punktu widzenia reaktory lekkowodne nie są zbyt atrakcyjne, dlatego też ciągle podejmuje się prace nad reaktorami wysokotemperaturowymi chłodzonymi helem HTGR, pozwalającymi osiągnąć sprawność ogólną rzędu 37% w obiegu jednokonturowym i ok. 45% w obiegu binarnym.

4. Uwagi końcowe

Zarysowujące się trudności bilansu paliwowo-energetycznego przy stałym wzroście zapotrzebowania na energię elektryczną i zwiększającej cenie paliw przemawiają za ponownym rozważeniem problemu optymalizacji turbin i bloków. Stąd wynika w sposób oczywisty rosnące zapotrzebowanie na badania naukowe i nowe opracowania projektowo-technologiczne.

LITERATURA

- [1] Alford J.S.: Protecting Turbomachinery from Self-Excited Rotor Whirl. Trans. ASME, Ser A.J.Eng.Power 1965, s. 33-344.
- [2] Bartoszek B., Fiszler W.: Powojenny rozwój energetyki zawodowej i jej perspektywy. Energetyka, 7/1974, s. 217-223.
- [3] Brand G.: Die Entwicklung grosser Dampfturbinen. BBC-Nachr. 5/6 1975.
- [4] Enzeberg L.V., Läge K.: Turbosätze für 600-MW-Blocke KWU-Konzeption. VGB-Kraftwerkstechnik 12/1973, s. 811-816.
- [5] Hohn A.: Die Lager von Dampfturbogruppen. BBC-Mitt. 3/1975.
- [6] Kellenberger W. i inni: Die Schleudernanlagen im Konzern-Wuolten und Schleudern von grossen Rotoren. BBC-Mitt. 6/1976, s. 399-411.
- [7] Kostjuk W.F. i inni: Rasczot porogowej moszczności krupnych turbogieniatorow. Tiepłoennergetika, 3/1974, s. 15-19.
- [8] Ławrenienko K.D. i inni: O pierspiektiwnych tipach osnovnogo oborudowanija elektrostancji. Tiepłoennergetika 9/1977, s. 2-5.
- [9] Moszyński J.R.: Energetyka za 100 lat i związane z nią problemy. Sprawozdanie Gdańskiego Towarzystwa Naukowego 3/1977, s. 142-144.
- [10] Power Reactors in Member States, Ed. 1975.
- [11] Ryżkow W.K. i inni: Razrabotka pierspiektiwnych konstrukcji i analiz maniewriennych charakteristik połupikowych parowych turbin moszcznosti 500 MWt i wysze. Tiepłoennergetika 10/1977, s. 2-7.
- [12] Scharff W. i inni: Das 1200 MW-Kernkraftwerk Graben, BBC-Mitt.1/1976.
- [13] Scheffczyk H.: Dampfturbinen (przeгляд). Elektrizitätswirtschaft 20/1976.
- [14] Somm E.: Brown Boveri Dampfturbinen - Entwicklung zur Realisierung von Grösstmaschinen. BBC-Mitt. 2/1976, s. 94-105.
- [15] Spurk J.H., Keiper R.: Selbsterregte Schwingungen bei Turbomaschinen infolge Labirynthströmung. Ingenieur-Archiv, 1974, s. 127-135.
- [16] Szyr E.: O gospodarowaniu paliwami i energią i możliwościami poprawy. Gospodarka Paliwami i Energią 9/1977 s. 1-5.
- [17] Tierentlew J.K. i inni: Razrabotka odnowalnogo paroturbinnoego agregata moszcznosti 2000 MW na 3000 obr/min. Energomaszinstrojenije 1/1974 s. 2-4.

- [18] Trybuna Ludu, 12.05.1977 r.
- [19] Ugołnikow W.W. i inni: Tichochodnyje turbiny dla AES. Tiepłoenegietika 8/1975, s. 2-9.
- [20] Ulrichs K.: Die Spalterregung bei thermischen Turbomaschinen als Ursache für die Entstehung schwingungsanfacherer Querkräfte. Ingenieur-Archiv, 1976, s. 193-208.
- [21] Weil K.H.: Möglicher Einfluss der Wasserstofftechnologie auf die zukünftige Energieversorgung, VGB Kraftwerkstechnik, 9/1974, s.574-577.
- [22] Zwahr H.: Steam turbines for nuclear power plants, Kerntechnik, 3/1975, s. 119-127.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Р е з ю м е

На фоне перспектив развития энергетики в период до 2000 г. обсуждены избранные проблемы паротурбостроения: увеличение удельной мощности при сохранении безопасности и надёжности на неизменённом уровне, улучшение манёвренных способностей, развитие полуликовых паровых турбин, некоторые аспекты турбостроения для ядерных энергетических установок. Указаны исследовательские проблемы, связанные с оптимизацией современных паровых турбин.

SOME ASPECTS OF HIGH OUTPUT STEAM TURBINES

S u m m a r y

Prospects of power engineering development up to the year 2000 are used as a background for a discussion of selected problems of constructing steam turbines of great output, namely the increase of the unit power without worsening the safety and operational reliability, improvement of manoeuvring quality, development of peak and intermediate loads steam turbines, and some aspects of turbine construction for nuclear power plants. Research problems arising in connection with optimization of new machines are pointed out.