

Turbiny Parowe (NS 577)

Moc graniczna turbiny jednotrumieniowej

WYKŁADOWCY

prof. dr hab inż. Andrzej Miller
prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda

Semestr 2012 Z

Moc graniczna turbiny jednostrumieniowej

Moc turbiny można określić ze wzoru:

$$N = m G_k H \eta_i \eta_m \eta_g$$

gdzie:

G_k - strumień masy opuszczającej turbinę,

m - współczynniki uwzględniający zwiększenie mocy przez strumienie pary odbierane przed wylotem, dla celów regeneracji, zwykle $m = 1.1 \div 1.3$. Odstępstwo od tej reguły dotyczy turbin parowych pracujących w układach gazowo-parowych, gdzie współczynnik ten może okazać się niższy od jedności (brak układu regeneracji, generacja pary na więcej niż jednym poziomie ciśnienia),

η_i - sprawność wewnętrzna turbiny

Wymaganie osiągnięcia mocy maksymalnej sprowadza się do warunku

$$G_k = G_{\max}$$

pozostałe wielkości określone są przez możliwości techniczne

$$G_k = F_{\text{wyl}} \frac{c_2}{v_k} = \pi D l \frac{c_2}{v_k} \quad \text{przy czym } F_{\text{wyl}} = \pi D l$$

c_2 - uśredniona prędkość wylotowa (wylot osiowy) - im wyższa tym większa strata wylotowa stopnia, racjonalna na poziomie 200-300 m/s - wynik rachunku techn.-ek.)

v_k - objętość właściwa pary (funkcja parametrów)

Moc graniczną, a więc i maksymalny przepływ osiągniemy przy maksymalnym przekroju przepływowym stopnia

$$F_{\text{wyl}} = F_{\text{wyl max}}$$

Podstawowe obciążenie długich łopatek, ich zamocowania w tarczy wirnikowej, oraz samej tarczy, wynika z ich rozciągania w kierunku promieniowym siłą odśrodkową bezwładności P , przy stopie łopatki

$$P = \frac{m \omega^2 D}{2} = \frac{\rho F_{\text{lop}} l \omega^2 D}{2} = \frac{1}{2\pi} \rho F_{\text{lop}} \omega^2 (\pi D l)$$

Naprężenie od działania tej siły można wyrazić wzorem:

$$\sigma = \frac{P}{F_{\text{lop}}} = \frac{1}{2\pi k} \rho \omega^2 F_{\text{wyl}}$$

gdzie k jest współczynnikiem uwzględniającym zmianę przekroju łopatki wzdłuż wysokości (osiąga wartości do około 3). Stąd:

$$F_{\text{wyl}} = k \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) \frac{1800}{\pi n^2}$$

gdzie n [obr/min] oznacza prędkość obrotową wirnika.

σ / ρ - można określić jako wytrzymałość właściwą materiału.

Jak można wnioskować w oparciu o przedstawione uproszczone ujęcie zagadnienia, największa powierzchnia wylotu F_{wyl} , a więc również moc graniczna uzyskiwana z jednego wylotu turbiny, zgodnie z warunkiem maksymalizacji mocy, a w istocie także strumienia masy pary wylotowej zależy przede wszystkim od:

- wytrzymałości właściwej σ/ρ stosowanego materiału łopatki wirnikowej, czyli stosunku jego wytrzymałości do gęstości,
- kwadratu odwrotności prędkości obrotowej,
- oraz konstrukcji łopatki wyrażonej wartością współczynnika k .

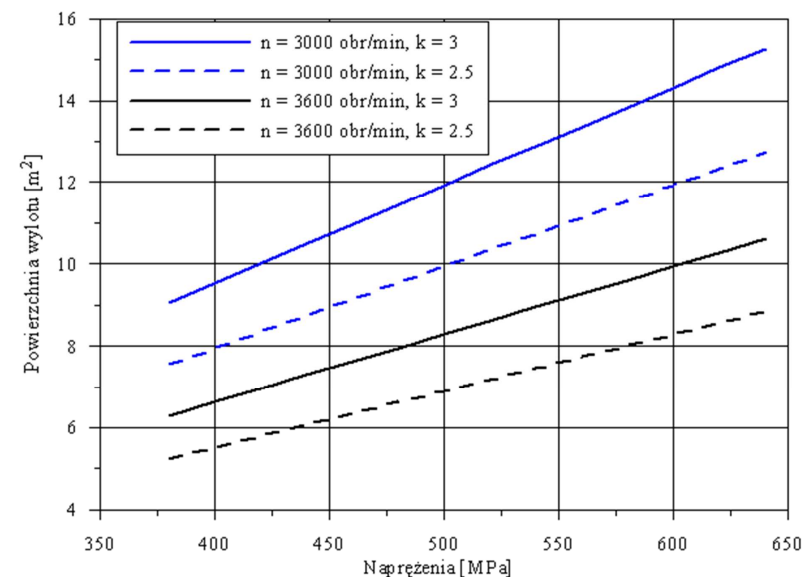
Decydujący wpływ ma tu wartość prędkości obrotowej wirnika turbiny. **W świecie stosowane są dwie standardowe („normalne”) wartości tej prędkości (3000 oraz 3600 obr/min).** Obciążenia od siły odśrodkowej pozostają tu w stosunku 1/1.44 rzutując na istotne ograniczenie konstrukcyjne możliwej do osiągnięcia powierzchni wylotu, a więc i długości łopatki w turbinach budowanych na wyższą z tych prędkości.

Obniżenie prędkości obrotowej o połowę, na przykład z 3000 do 1500 obr/min pozwala na teoretycznie czterokrotne powiększenie powierzchni F_{wyl} oraz mocy granicznej, w stosunku do wartości wyjściowej. Takie obniżenie prędkości obrotowej wymaga zastosowania wolnobieżnego generatora, wyposażonego w dwie pary biegunów (skutkuje to dużymi rozmiarami).

Dla standardowego materiału konstrukcyjnego łopatek ostatnich stopni, jakim jest **stal wysokostopowa o gęstości $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$** graniczne naprężenie od sił odśrodkowych podawane w literaturze osiąga poziom od około 380 MPa (rozwiązania „klasyczne”, starsze do około 620 MPa (rozwiązania współczesne, nowsze o wzmocnionej strukturze).

Graniczna powierzchnia wylotu dla tych warunków, przy współczynniku $k = 3$ kształtuje się na poziomie 9.0 m^2 w przy naprężeniach bliskich pierwszej z granic (380 MPa) oraz prędkości obrotowej wirnika 3000 obr/min. Przy wyższej ze wskazanych granic, dla współczynnika $k = 2.5$, powierzchnia ta rośnie do poziomu 11.9 m^2 . W turbinach projektowanych na prędkość obrotową wirnika 3600 obr/min powierzchnia wylotu maleje proporcjonalnie do kwadratu stosunku prędkości obrotowej, a więc odpowiednio do 6.25 oraz 8.3 m^2 .

Typowy w konstrukcjach tej klasy stosunek średnicy podziałowej do wysokości łopatki $d/l \approx 2.7$ prowadzi (przy 3000 obr/min) do łopatek o maksymalnej dopuszczalnej długości **1 ? 1200 mm, albo 48 cali**. Łopatki turbin projektowanych na prędkość obrotową 3600 obr/min, przy tej samej proporcji d/l oraz zachowaniu obciążenia mechanicznego muszą być krótsze. **Zmiana dopuszczalnej długości następuje w relacji odwrotnej do stosunku prędkości obrotowych (1.2).** We wskazanym przypadku długość ta maleje więc odpowiednio do 1000 mm albo 40 cali.



Graniczna powierzchnia wylotu ostatniego stopnia, wartości orientacyjne według zależności (6) przy prędkości obrotowej 3000 oraz 3600 obr/min, dla wartości współczynnika $k = 2.5$ oraz 3

Dla stali wysokostopowych $k \approx 3$ $\rho \approx 8000 \text{ kg/m}^3$

$$F_{wyl} = 0.215 \sigma / n^2 \approx 9 \text{ m}^2$$

dla typowych naprężeń dopuszczalnych - około $\sigma = 380 \text{ MPa}$ i prędkości obrotowej $n = 3000 \text{ obr/min}$

długości maksymalne łopatek - dla stali do ponad 1 m (złożone kształty)



Łopatki ostatnich stopni turbin GE (starsze, obecne, przyszłe)

Wskazane powyżej rozważania mają charakter przybliżony. Ostateczny „wynik” w postaci odpowiednio zaprojektowanego stopnia turbinowego zależy od czynników nie uwzględnionych w przytoczonym powyżej podejściu uproszczonym. Łopatka turbinowa przenosi jeszcze szereg nie uwzględnionych powyżej obciążeń, podobnie jej stopka oraz zamocowanie w tarczy.

Wartość możliwej do uzyskania mocy granicznej zależy nie tylko od wskazanych uwarunkowań związanych z możliwością budowy odpowiednio dużego wylotu, ale także stosowanych parametrów pary, rozwiązania technologicznego bloku oraz układu chłodzenia. **Na przełomie lat 70- i 80-tych ubiegłego wieku, granica ta leżała w obszarze 140 MW, przy nadkrytycznych parametrach pary oraz niskiej próżni.** Współcześnie, w turbinie kondensacyjnej na wysokie (supernadkrytyczne) parametry pary, uzyskuje się znacząco, nawet dwukrotnie więcej. Znamiennym przykładem są uruchomione w ostatnim okresie dwa bloki energetyczne Elektrowni Neurath w Niemczech, gdzie turbina parowa o mocy (brutto) 1100 MW zbudowana została w układzie czterokadłubowym, z dwiema częściami niskoprężnymi (cztery wyloty pary do skraplacza), w zamkniętym układzie chłodzenia (chłodnie kominowe), a więc przy stosunkowo wysokim (48 kPa) ciśnieniu wylotowym. **Moc uzyskiwana nominalnie z jednego wylotu w tej maszynie to 250 (275) MW.**

Jest to w głównej mierze wynikiem postępu technologicznego związanego z: pokonaniem bariery materiałowej. To w głównej mierze pozwoliło w ostatnim czasie na budowę siłowni na bardzo wysokie parametry pary, wprowadzenie nowych, wraz z wcześniej nie stosowanymi rozwiązaniami w układach cieplnych. **Możliwości podwyższenia bariery mocy granicznej wynikają z zabiegów omówionych dalej.**

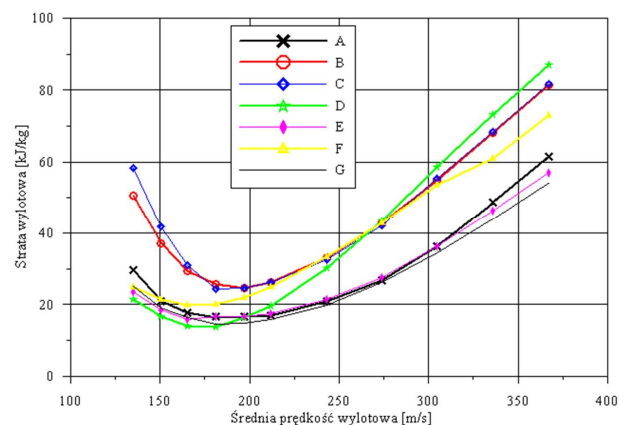
Zabiegi powiększające moc graniczną:

- obniżenie prędkości obrotowej (turbina wolnobieżna) - 4-krotny wzrost przy 1500 obr/min
- dopuszczenie większych prędkości pary (wzrost straty wylotowej 1.5 raza - wzrost mocy granicznej o ok. 22%)
- podniesienie ciśnień wylotowych (v_k rośnie szybciej niż spadek izentropowy),
- zmiana materiału łopatki (np. tytan),
- rozbudowa układu regeneracji,
- wylot typu Baumana,
- turbiny wielostrumieniowe - większa liczba wylotów.

Obniżenie prędkości obrotowej o połowę, czyli budowa turbin wolnobieżnych, skonstruowanych do pracy z prędkością 1500, bądź 1800 obr/min. Pozwala to teoretycznie podwyższyć moc graniczną nawet czterokrotnie, przy zbudowaniu łopatki ostatniego stopnia o dwukrotnie większej długości od stosowanej w turbinie obracającej się z prędkością normalną. W praktyce zabieg ten stosowany jest przede wszystkim w turbozespołach elektrowni jądrowych. Konsekwencją jest rozrost wymiarów turbiny oraz generatora. Zwykle zmiana długości łopatki nie przekracza przyrostu około 50 procentowego w stosunku do turbin przystosowanych do pracy z normalną prędkością obrotową. Przyczyną jest pogorszenie warunków przepływu towarzyszące łopatom bardzo długim, skutkujące komplikacją rozwiązania konstrukcyjnego.

Dopuszczenie dużej prędkości pary wylotowej ostatniego stopnia. Wiąże się to z jednej strony ze wzrostem straty wylotowej turbiny oraz pogorszeniem jej sprawności, z drugiej zaś ze wzrostem mocy granicznej. Przeciętnemu powiększeniu straty wylotowej o 50% towarzyszy wzrost mocy granicznej o około 25%, przy równoczesnym obniżeniu sprawności turbiny na wysokie parametry o około 0.7%.

Zabiegi pozwalające na podwyższenie mocy granicznej

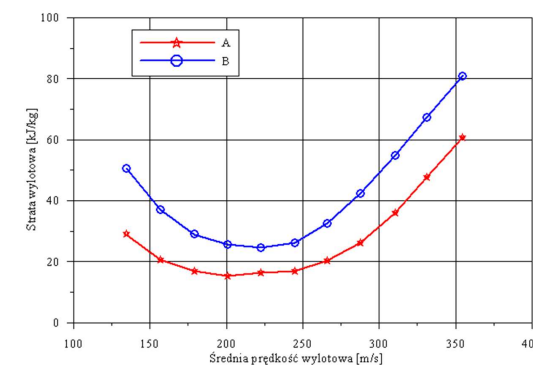


Typowe, pochodzące od wytwórców, krzywe ilustrujące przebieg straty wylotowej w funkcji średniej prędkości wylotowej pary za stopniem.

Zabiegi pozwalające na podwyższenie mocy granicznej

Rozwój nowej generacji, często niekonwencjonalnych profili łopatek, z dużymi zmianami geometrii wzdłuż wysokości, przyniósł znaczne korzyści pod względem poprawy sprawności, w tym redukcji straty wylotowej.

Rysunek obok ilustruje zmienność straty wylotowej dla dwóch konstrukcji ostatniego stopnia z różnych wytwórni - z prawie identycznym wylotem i długością łopatek. Można dojść do wniosku, że bardziej zaawansowana budowa profilu 3-D (krzywa A) prowadzi do istotnego obniżenia straty wylotowej.



Całkowita strata wylotowa jest nie tylko wynikiem konstrukcji ostatniego stopnia, ale także konstrukcji układu wylotowego pary. Dlatego poprawa sprawności ostatnich stopni turbinowych, w tym forsowanie mocy granicznej, musi być związana z odpowiednimi zabiegami konstrukcyjnymi w obszarze wylotu pary (dyfuzor wylotowy, wlot pary do skraplacza).

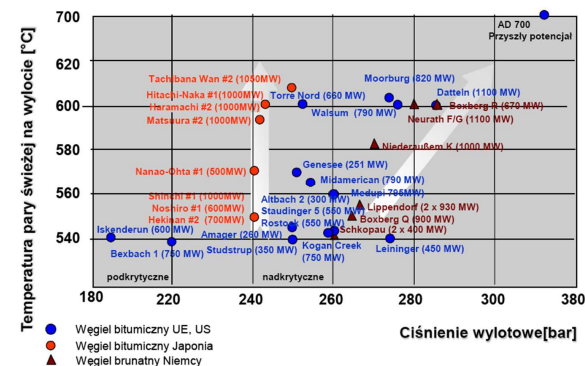
Zabiegi pozwalające na podwyższenie mocy granicznej

Stosowanie wyższego ciśnienia na wylocie z turbiny. Objętość właściwa pary wylotowej maleje szybciej niż izentropowy spadek entalpii w turbinie. Rośnie przez to dopuszczalny strumień masy pary oraz moc graniczna. Zabieg ten skutkuje również obniżeniem sprawności. Dobór ciśnienia wylotowego oraz straty wylotowej prowadzony jest zwykle w oparciu o kompleksowy rachunek techniczno-ekonomiczny. Uwzględnia się w nim z jednej strony zmniejszenie kosztów zmiennych przy pogłębieniu próżni oraz zmniejszeniu prędkości wylotowej, zaś z drugiej strony wzrost kosztu „zimnego końca” obejmującego wylot turbiny, skraplacz oraz układ chłodzenia, będący skutkiem powiększenia rozmiarów tych elementów.

Zmiana materiału konstrukcyjnego łopatki wirującej ostatniego stopnia, pozwalająca na zmianę jej długości. W praktyce jako jedyna kategoria materiałów o pożądanych do tego zastosowania cechach to stopy tytanu. Gęstość materiałów konstrukcyjnych na bazie tytanu jest około 1.8 razy mniejsza niż stali, przy zachowaniu tych samych, bądź wyższych własnościach wytrzymałościowych. Dodatkową zaletą tych stopów jest wyższa niż dla stali odporność na erozję oraz korozję. Wadami są: znacząco wyższy koszt samego materiału oraz znacznie większe trudności w obróbce. Doświadczenia z wykorzystaniem stopów tytanu do budowy łopatek ostatnich stopni turbin parowych sięgają końca lat 70-tych. Typowe wykorzystywane materiały to Ti-5Al, Ti-6Al-4V oraz Ti-6Al-6V-sSn. W odniesieniu do tej klasy materiałów często w uproszczeniu mówi się o wykorzystaniu tytanu.

Zabiegi pozwalające na podwyższenie mocy granicznej

Podwyższanie parametrów początkowych pary oraz modyfikacja układu technologicznego bloku energetycznego służąca poprawie sprawności. Obniżenie jednostkowego zużycia ciepła dostarczanego do turbiny na produkcję energii elektrycznej (albo podwyższanie sprawności wewnętrznej) jest środkiem do podnoszenia mocy granicznej przy nie zmieniającym się przepływie pary. W ostatnim czasie odnotowano znaczący postęp w tej dziedzinie. Wytwórcy działający w Europie oraz na rynku amerykańskim wprowadzali w kolejnych aplikacjach coraz wyższe ciśnienie oraz temperaturę pary świeżej. Firmy japońskie pozostawały przy opanowanym już dość dawno ciśnieniu pary świeżej nie przekraczającym poziomu 25 MPa (rysunek poniżej).

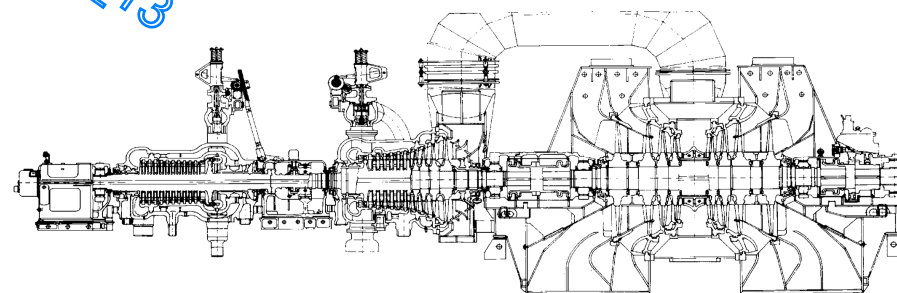


Zabiegi pozwalające na podwyższenie mocy granicznej

Działaniami, związanym z podnoszeniem sprawności siłowni, odnoszącym się bezpośrednio do turbin parowych było **wprowadzenie kształtowanych przestrzennie układów łopatkowych** nie tylko stopni ostatnich, ale również tych wyposażonych w krótsze łopatki.

Zastosowanie wylotu typu Baumana. Zabieg ten, polegający na wyprowadzeniu części pary z przedostatniego stopnia bezpośrednio do skraplacza – z pominięciem stopnia ostatniego, pozwala powiększyć powierzchnię wylotu około 1.5 krotnie, praktycznie bez zmiany obciążenia i długości łopatki ostatniego stopnia. Z zabiegiem tym związane jest pogorszenie sprawności turbiny, co jest wynikiem obniżonej sprawności stopnia Baumana. W przeszłości, wobec braku możliwości budowy odpowiednio długich łopatek turbinowych, często korzystano z tego sposobu podwyższenia mocy granicznej. Rozwiązanie jest dobrze w Polsce znane z pierwotnej konstrukcji turbin klasy 125 oraz 200 MW, z którego w większości przypadków zrezygnowano w ramach modernizacji części niskoprężnych.

Przekrój osiowy turbiny 13K215



Dane techniczne:

Temp. pary świeżej / przegrzanej	- 535/535 °C
Ciśn. pary świeżej	- 12.75 MPa
Natężenie przepływu pary	- 656 t/h
Moc znamionowa	- 200 MW
Obroty znamionowe	- 3000 obr / min

Stopień Baumana

Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin o prędkości obrotowej 3000 obr/min z przełomu lat 70-tych oraz 80-tych ubiegłego wieku (A. Miller Turbiny Elektrowni Jądrowych, WPW 1981

Wytwórnia	n [obr/min]	l [mm]	D [mm]	F _{wyl} [m ²]	u _{max} [m/s]
BBC	3000	1200	3250	12.25	700
LMZ*	3000	1200	2900	10.93	644
AEI	3000	1143	2970	10.68	639
KWU	3000	1080	~2900	~10	~633
BBC	3000	1000	2820	8.82	600
HTGZ	3000	1050	2550	8.41	565
LMZ	3000	960	2480	7.48	540
GEC, Parsons	3000	940	2460	7.28	534
Skoda	3000	870	2470	6.76	524
HTGZ	3000	852	2350	6.26	503
Zamech	3000	765	2100	5.04	450

* Łopatką wykonaną ze stopu tytanu,

** zastosowano wylot Baumana o łącznej powierzchni $5.04 + 2.6 = 7.64 \text{ m}^2$.

Już wówczas budowane były łopatki ze stopów tytanu (w ofercie wytwórni LMZ, która już wówczas dysponowała doświadczeniami eksploatacyjnymi z wykorzystaniem tej klasy materiałów). Drugim znamienym faktem jest to, że już wówczas oferowane były łopatki o długości 1200 mm (47.25 cala – wytwórnia LMZ oraz BBC, później w strukturach koncernu ABB). Pozwalało to uzyskać powierzchnię wylotu bliską wskazwanej współcześnie jako graniczna

Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin o prędkości obrotowej 3000 obr/min. Stan w drugiej połowie dekady 2001-2010, zestawienia dokonano według Leyzerovich – „Wet Steam Turbines for NPP” – Pennwell 2005

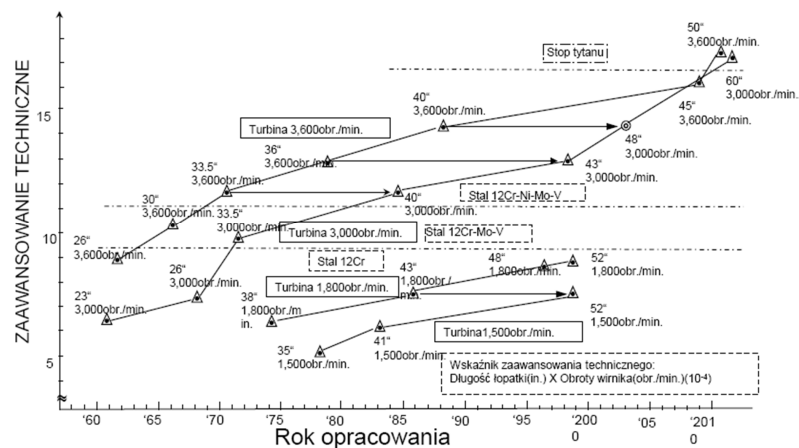
Wytwórnia	n [obr/min]	l [mm]	D [mm]	F _{wyl} [m ²]	Materiał	Uwagi
LMZ	3000	1500	3800	17.9	stop Ti	Opracowywana
Siemens	3000	1423	3580	16	stop Ti	Opracowywana
MHI	3000	1372	3390	14.6	stop Ti	Opracowywana
ALSTOM	3000	1360	3440	14.7	stop Ti	Opracowywana
GE/Toshiba	3000	1219	3110	11.9	stal, stop Ti	Dostępna od 2003
MHI	3000	1219	2950	11.3	stal	-
ABB	3000	1200	3240	12.25	stal, stop Ti	Pracuje od l. 80
LMZ	3000	1200	3000	11.3	stop Ti	Pracuje od 1979
Siemens	3000	1146	3470	12.5	stal	Dost.od 2003, sw.
ALSTOM	3000	1130	2960	10.5	stal	-
Turboatom	3000	1100	3010	10.4	stal	Opracowywana
Hitachi	3000	1092	2940	10.1	stal	-
Siemens	3000	1093	2910	10	stal	Swobodna
Skoda	3000	1085	2790	9.5	stal	-
Toshiba	3000	1067	2830	9.5	stal	-
ABB	3000	1050	2940	9.7	stal	Swobodna
Turboatom	3000	1050	2550	8.4	stal	-
MHI	3000	1030	2900	9.4	stal	-
GE	3000	1021	2740	8.8	stop Ti	-
Toshiba, Hitachi	3000	1016	2740	8.76	stop Ti	-
ABB	3000	1000	2710	8.5	stal	Swobodna
Siemens	3000	978	3250	10	stal	Swobodna
LMZ	3000	960	2490	7.5	stal, stop Ti	-

Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin o prędkości obrotowej 3600 obr/min. Stan w drugiej połowie dekady 2001-2010, zestawienia dokonano według Leyzerovich – „Wet Steam Turbines for NPP” – Pennwell 2005

Wytwórnia	n [obr/min]	l [mm]	D [mm]	F _{wyl} [m ²]	Materiał	Uwagi
Siemens	3600	1194	2960	11.1	stop Ti	Opracowywana
MHI	3600	1143	2810	10.1	stop Ti	-
Siemens	3600	1067	3070	10.3	stop Ti	-
GE/Toshiba	3600	1016	2660	8.5	stop Ti	-
Hitachi	3600	1016	2630	8.4	stop Ti	-
GE/Toshiba	3600	1016	2600	8.3	stop Ti	Dost. od 2003
MHI	3600	1016	2440	7.8	stal, stop Ti	-
Siemens	3600	955	2900	8.7	stal	Swobodna
Turboatom	3600	858	2110	5.68	stal	-
Hitachi, Toshiba	3600	852	2320	6.2	stal	-
GE	3600	852	2300	6.15	stal	-
Siemens	3600	815	2690	6.9	stal	Swobodna

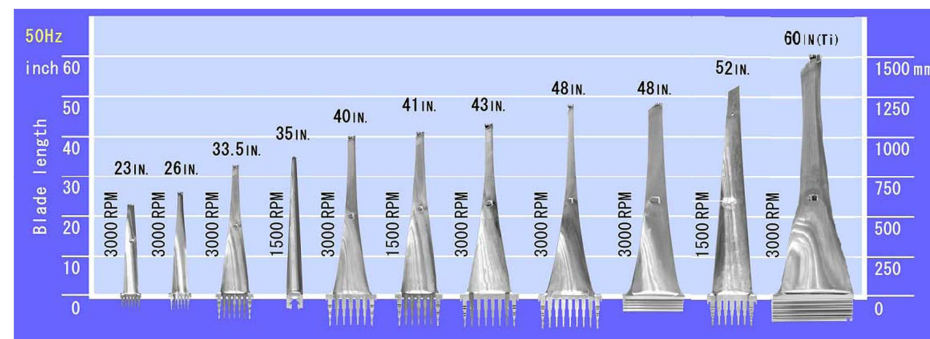
Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin o prędkości obrotowej 1800 obr/min. Stan w drugiej połowie dekady 2001-2010, zestawienia dokonano według Leyzerovich – „Wet Steam Turbines for NPP” – Pennwell 2005

Wytwórnia	n [obr/min]	l [mm]	D [mm]	F _{wyl} [m ²]	Materiał	Uwagi
Siemens	1800	1525	1530	20.3	stal	Swobodna, oprac.
MHI	1800	1375	1380	17.8	stal	-
Siemens	1800	1370	1370	17.3	stal	Swobodna
Hitachi, Toshiba	1800	1320	1320	16.7	stal	-
ABB	1800	1320	1320	16.4	stal	Swobodna
GE	1800	1320	1320	15.8	stal	-
Siemens	1800	1270	1270	15.35	stal	Swobodna
Hitachi	1800	1220	b/d	N/A	stal	Swobodna
ALSTOM, W	1800	1194	1190	13.4	stal	-
Siemens	1800	1170	1170	13.4	stal	Swobodna
MHI	1800	1170	1170	12.5	stal	-
ALSTOM	1800	1170	1170	12.2	stal	-
GE	1800	1143	1140	12.3	stal	-
Westinghouse	1800	1118	1120	11.8	stal	-
GE, Hitachi	1800	1092	1090	11.5	stal	-
MHI	1800	1041	1040	10	stal	-
Westinghouse	1800	1016	1020	9.6	stal	-



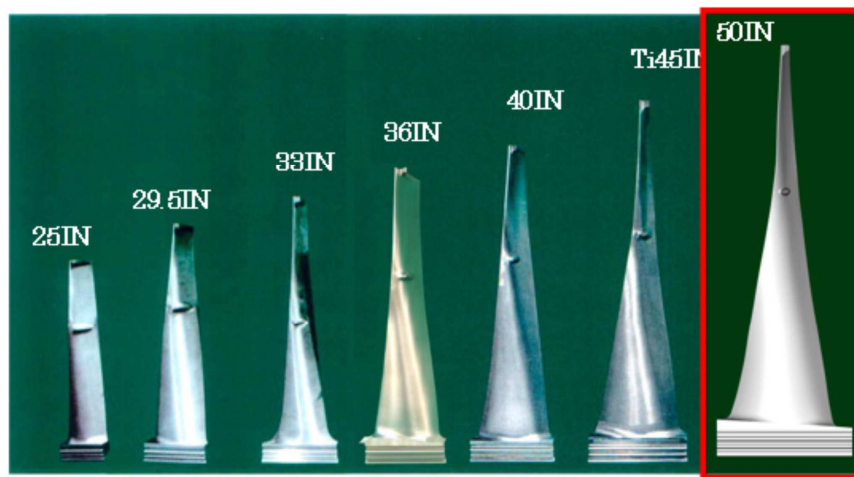
Rozwój konstrukcji łopatek ostatnich stopni turbin parowych wielkiej mocy. Hitachi

Jako wskaźnik zaawansowania technicznego rozwiązania konstrukcji ostatniego stopnia wykorzystano tu iloczyn długości łopatki oraz prędkości obrotowej wirnika (oznacza to sprowadzenie do „wspólnego mianownika” rozwiązań adresowanych do różnej prędkości obrotowej).



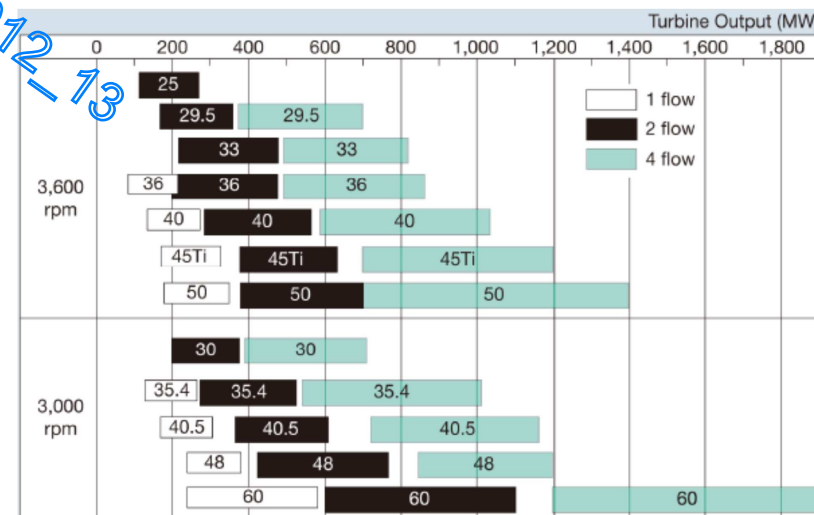
Zestawienie oferowanych przez Hitachi łopatek ostatniego stopnia turbin parowych przystosowanych do współpracy z siecią o częstotliwości 50 Hz.

Hitachi ma w dotychczasowej ofercie szeroką pulę łopatek ostatniego stopnia, zilustrowaną na rysunku powyżej, w zakresie turbin dla sieci o częstotliwości 50 Hz. Jej uzupełnienie stanowi opracowana łopatka ze stopów tytanu przygotowana dla turbin pracujących z prędkością 3000 obr/min oraz 1250 mm (50 cali według deklaracji producenta) - dla maszyn przystosowanych do pracy przy 3600 obr/min. Przekłada się to na deklarowaną powierzchnię wylotu odpowiednio 16.5 oraz 11.5 m².



Zestawienie oferowanych przez Mitsubishi przykładowych łopatek ostatniego stopnia turbin parowych, ostatnia łopatka nowej konstrukcji o długości 1270 mm (aplikacja 60 Hz).

Materiałem zastosowanym na łopatki o ekstremalnej długości jest wysokowytrzymała stal PH13-8Mo (ASTM A705-XM13) - nowo opracowany.



Zakres zastosowań łopatek ostatnich stopni turbin parowych, z uwzględnieniem nowych łopatek konstrukcji MHL. Różnymi kolorami zaznaczono układ jednego, dwóch oraz czterech wylotów pary.

Obecna oferta wielkich koncernów dotycząca turbin parowych wielkiej mocy w zakresie mocy granicznej obejmuje, jako ekstremalne, omówione dalej przykładowe rozwiązania. Wybrano kilka najbardziej charakterystycznych danych wynikających z nowych informacji podawanych przez największych wytwórców.

W przypadku General Electric (turbiny parowe seria G3, przystosowane do współpracy z siecią o częstotliwości 60 Hz – 3600 obr/min) moc do 1100 MW, parametry pary świeżej 260 bar/610°C/620°C, układ 4 kadłubowy (WP, SP, 2 x NP), 4 wyloty NP, łopatką ostatniego stopnia 45 cali (1143mm) ze stopów tytanu. Dla turbin pracujących z prędkością obrotową 3000 obr/min GE nie oferuje turbin tej klasy mocy. Długość ostatniej łopatki z aplikacji 60-hertzowej, po przeliczeniu na 3000 obr/min to odpowiednio 54 cale, albo 1372 mm.

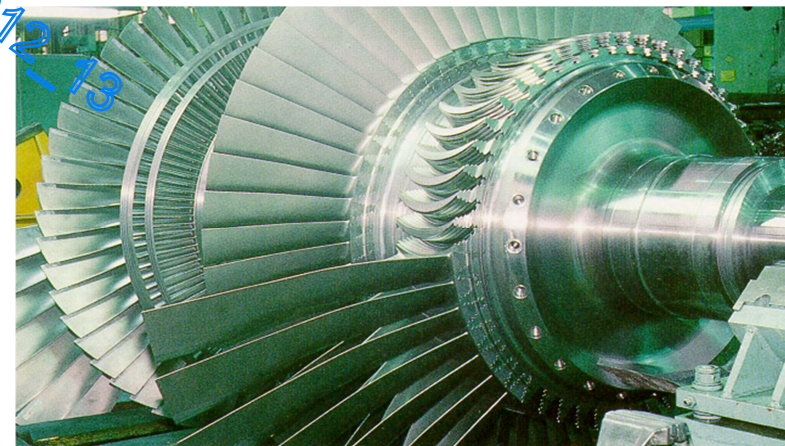
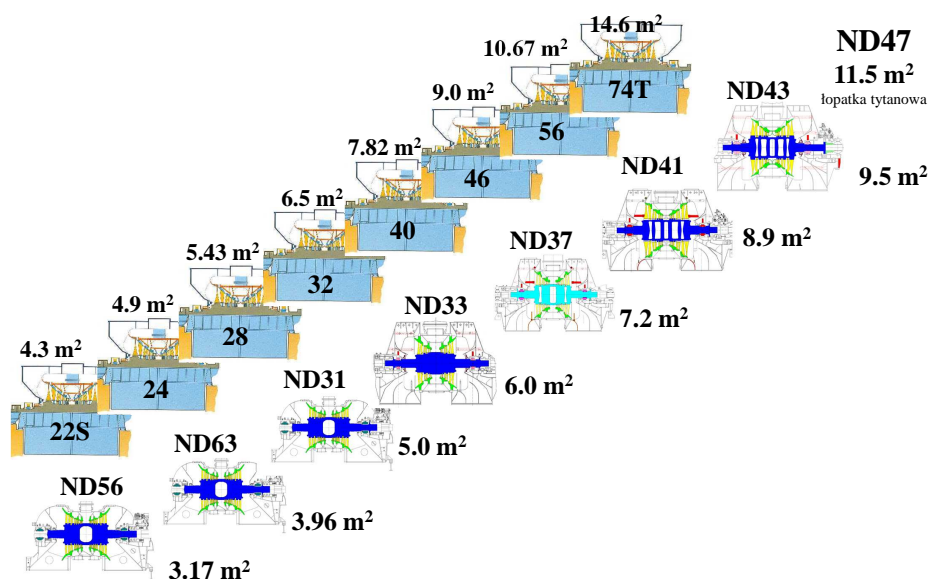
Przez Siemens Power Generation w klasie wielkiej mocy oferowane są aktualnie turbiny parowe serii SST-6000, o mocy do 1200 MW. W aplikacjach dla sieci o częstotliwości 50 Hz: powierzchnia wylotu to od 5 m² do 16 m², długość ostatniej łopatki od 27.5 do 56 cali (699 do 1423 mm). W aplikacjach dla sieci o częstotliwości 60 Hz: powierzchnia wylotu to od 4.4 m² do 11.1 m², długość ostatniej łopatki od 24 do 47 cali.

Alstom Power oferuje dla klasycznych elektrowni parowych turbiny STF100 w zakresie mocy 700-1200 MW, w układzie cztero- oraz pięciokadłubowym (dwie lub trzy części NP). W układzie czterokadłubowym budowane są turbiny o mocy przekraczającej poziom 1100 MW (przykład Elektrowni Neurath).

W zakresie mocy 200-700 MW w ofercie Hitachi, znajduje się dwukadłubowa turbina kondensacyjna. Podobnie jak rozwiązaniu oferowanym od lat przez GE część WP/SP zabudowane są tu jako integralna konstrukcja we wspólnym kadłubie. Uzupełnienie stanowi jedna, dwustrumieniowa część NP (z łopatkami o różnej długości w obu wylotach). Rozwiązanie trójkadłubowe rekomendowane jest dla turbin o mocy z zakresu 600-790 MW (integralna konstrukcja WP/SP oraz dwie części NP). Czterowylotowe turbiny czterokadłubowe budowane przez wytwórnię obejmują zakres mocy 800-1300 MW. Takie rozwiązanie umożliwia korzystanie z dwustopniowego - szeregowego podgrzania wody chłodzącej.

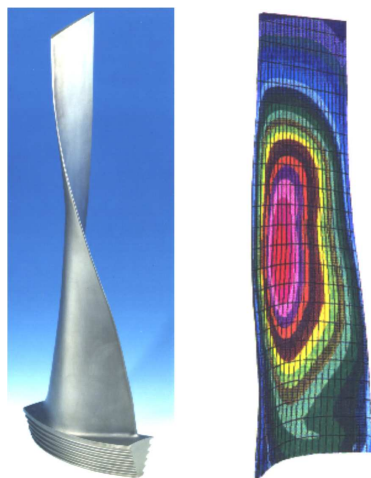
Mitsubishi, kolejny wielki koncern japoński aktywny w produkcji turbin parowych wielkiej mocy oferuje w swoich konstrukcjach turbin wielkiej mocy łopatką turbinową ostatniego stopnia o długości 50 oraz 60 calowej (1270 oraz 1524 mm), odpowiednio przeznaczonych dla aplikacji w turbinach pracujących z siecią o częstotliwości 60 oraz 50 Hz. dla aplikacji 50-hertzowych MHI oferuje turbiny w układzie dwóch części NP (cztery wyloty) dla mocy do 1200 MW. Do tego celu wystarczająca okazuje się łopatką o długości 48 cali. Wykorzystanie łopatki 60-calowej daje znacznie szersze możliwości, w tym budowę turbin klasy 1000 MW z jedną dwustrumieniową częścią NP!

Wyloty ABB i Alstom



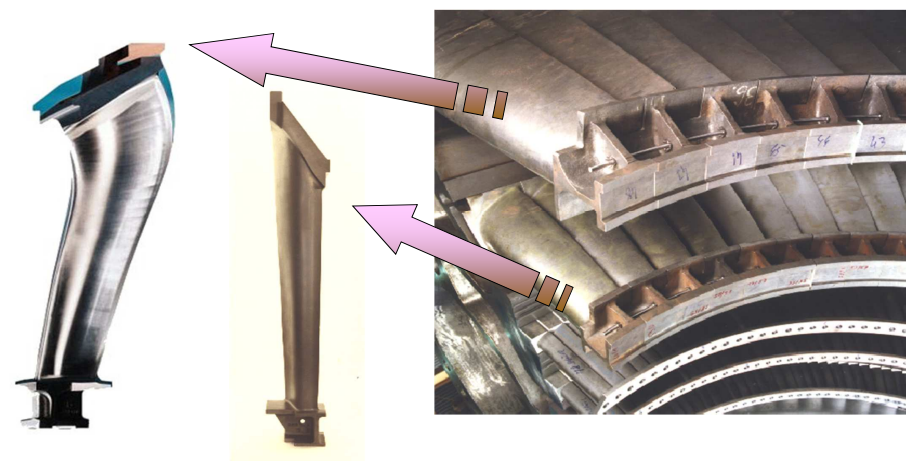
Montaż łopatek wirnikowych części NP

Łopátka wirnikowa stopnia ostatniego (Alstom Power)



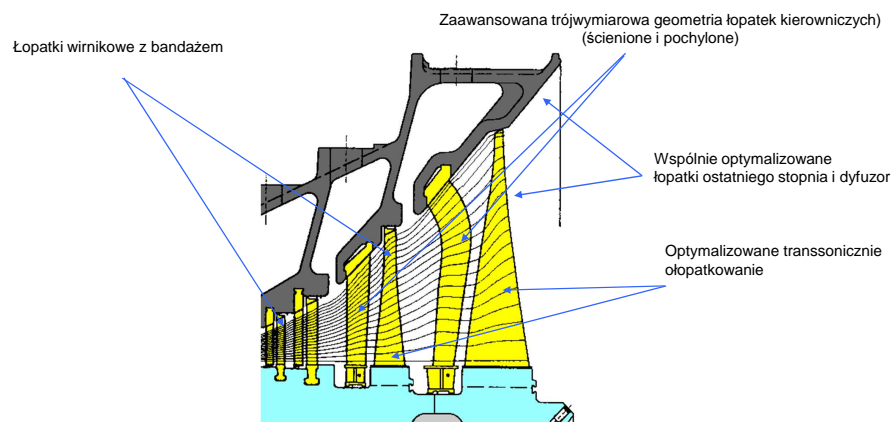
- ◆ Pewność pracy dzięki dokładnym obliczeniom częstości własnych
- ◆ Prosta wymiana pojedynczych łopatek
- ◆ Indukcyjnie hartowana krawędź napływu

Lane łopátki kierownicze dwóch ostatnich stopni



Turbiny_Parowe_2012_13

Konfiguracja układu łopatkowego ostatnich stopni (Alstom)

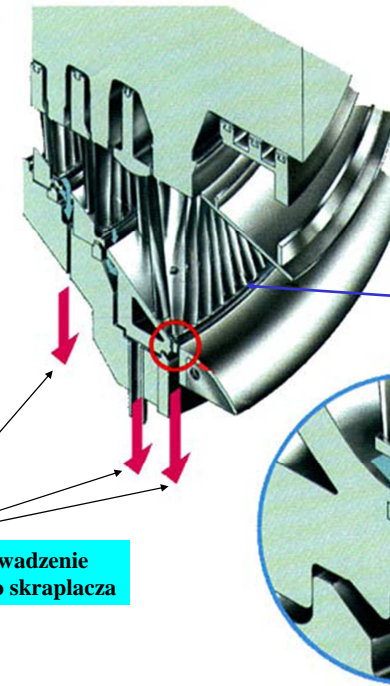
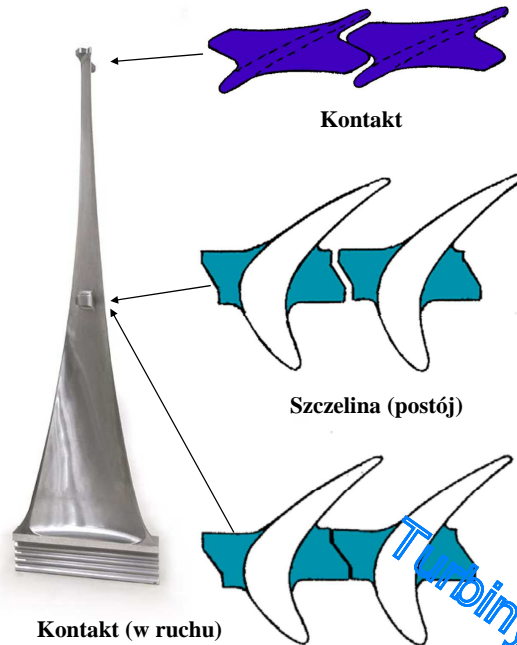


Wieniec wirnikowy ostatniego stopnia turbiny wielkiej mocy (60 cali – Hitachi)





Tłumienie drgań w wyniku kontaktu łopatek w wybranych strefach pozwala na ograniczenie obciążeń dynamicznych w ruchu

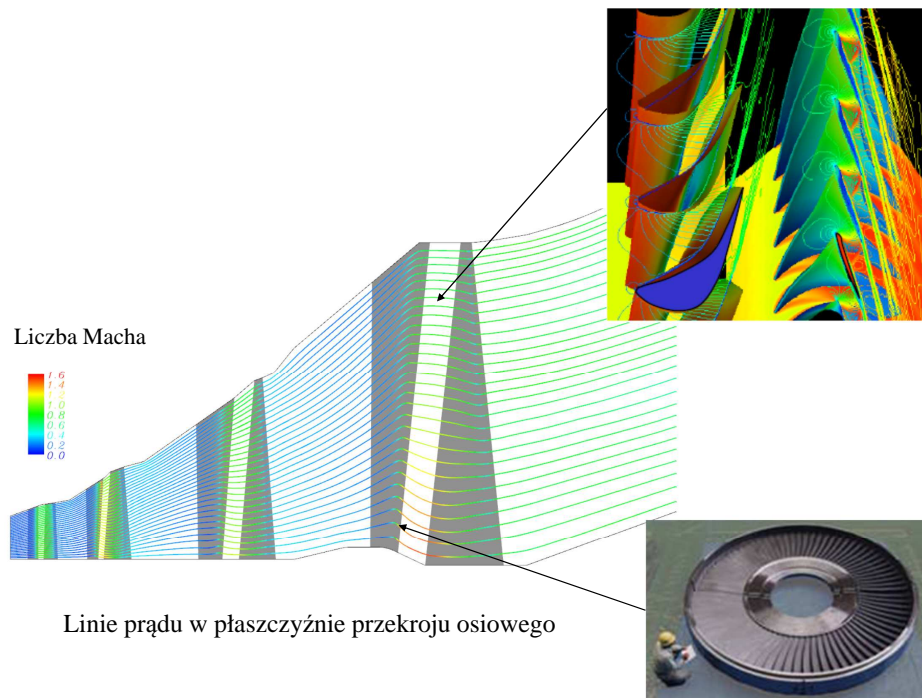


Usuwanie wilgoci w obrębie ostatnich stopni części NP stanowi środek zapobiegający erozji łopatek ostatnich stopni turbiny

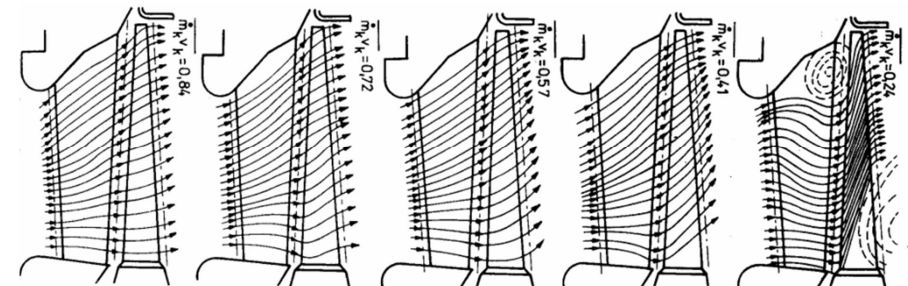
Łopátka ostatniego stopnia

Odprowadzenie wilgoci do skraplacza

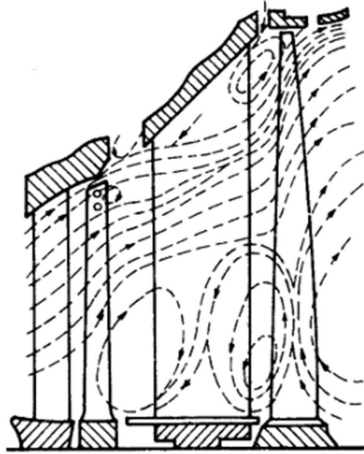
Usuwanie wilgoci



Obraz przepływu w obrębie ostatniego stopnia w funkcji zmiany obciążenia (problem opanowania pola przepływu w warunkach pracy bardzo długich łopatek i zmiennych warunków pracy)



Obraz przepływu w ostatnim stopniu turbiny kondensacyjnej w zakresie ujemnej sprawności, przy $m \cdot v = 0.14$



Turbiny_Parowe_2012_13

Możliwości poprawy

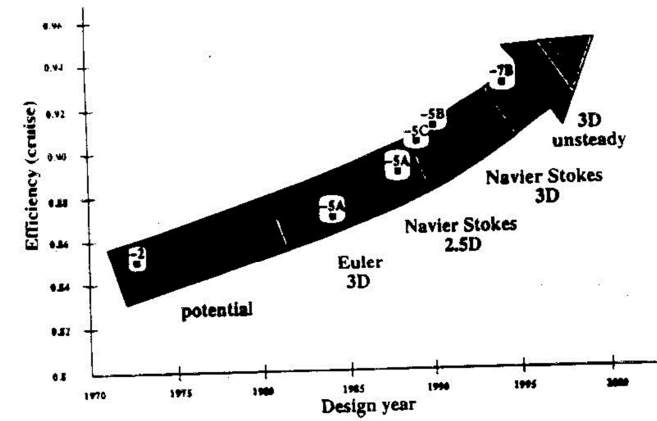


Fig.1 Impact of CFD's on Fan performance

Możliwości poprawy

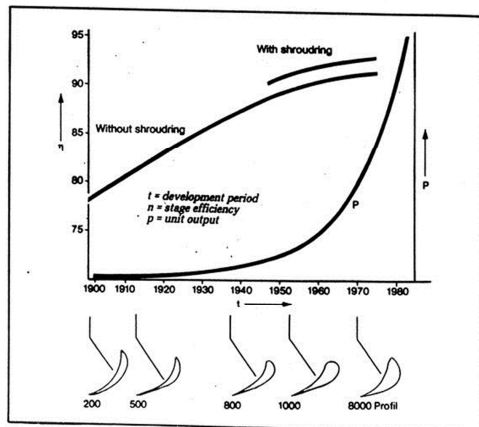


Figure 4. The development of efficiency and unit output in steam turbines

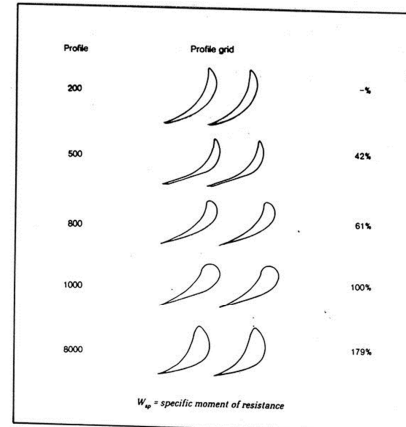


Figure 7. Comparison between the specific moments of resistance of various blade profiles