

Turbiny Parowe (NS 577)

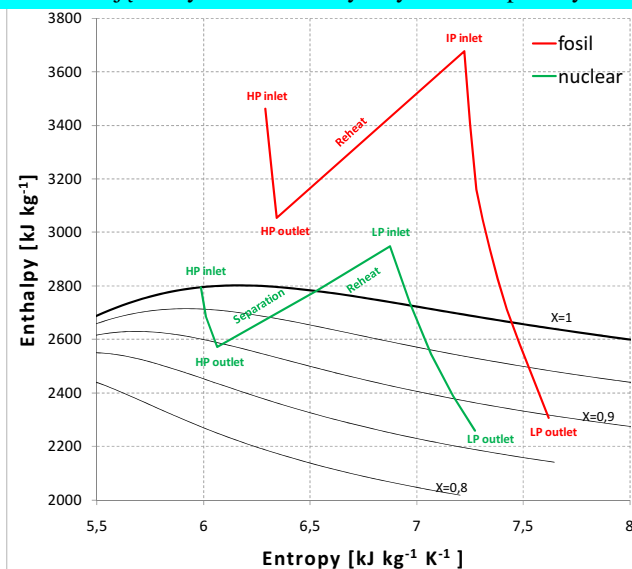
Turbiny dla elektrowni jądrowych

WYKŁADOWCY

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

Semestr 2012 Z

Dwukrotnie mniejszy rozporządzalny spadek entalpii w turbinie dla elektrowni jądrowych niż dla klasycznych turbin parowych



Turbiny dla elektrowni jądrowych

Układ cieplny elektrowni jądrowej określony jest głównie przez typ zastosowanego reaktora jądrowego, z którym nierozłącznie związany jest i układ generacji pary. Z kolei układ cieplny EJ ma decydujący wpływ na konstrukcję turbiny, jej osiągi i eksploatację. Konstrukcja turbiny określona jest bowiem głównie przez parametry i natężenie przepływu pary na wlocie, sposób włączenia międzystopniowej separacji wody i przegrzewu pary, zasilania turbiny parą z jednego lub kilku źródeł i inne cechy układu cieplnego siłowni. Od typu bloku zależy też, czy turbina zasilana jest parą radioaktywną czy "czystą".

Turbiny parowe na parę moką dla siłowni jądrowych

Charakterystyczne cechy :

Parametry pary dolotowej i ciśnienie w skraplaczu:

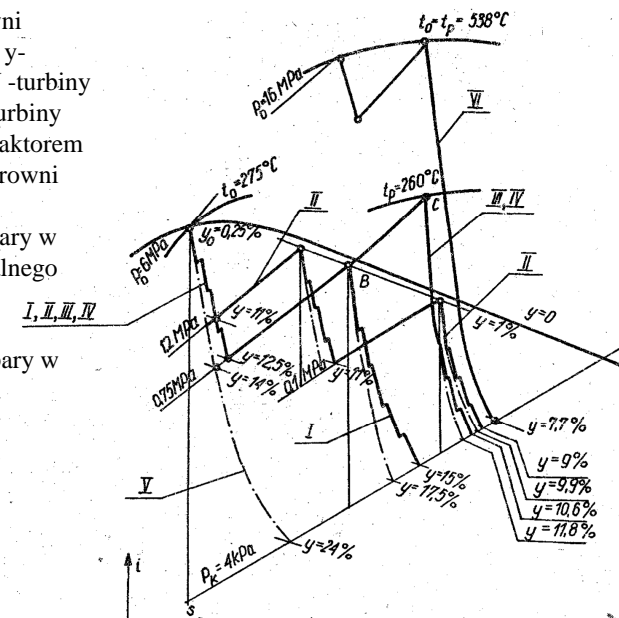
- ciśnienie pary świeżej w zakresie 4,5 ÷ 7 MPa,
- temperatura pary bliska temperatury nasycenia (możliwe niewielkie przegrzanie pary o 15÷30°C,
- ciśnienie w skraplaczu podobne jak w klasycznych siłowniach.

Schemat procesu rozprężania pary w turbinie elektrowni jądrowej przy $p=6$ MPa, $y=0,25\%$, $p_k=4$ kPa I-IV - turbiny na parę nasyconą; VI - turbiny elektrowni jądrowej z reaktorem gazowym i turbiny elektrowni konwencjonalnych

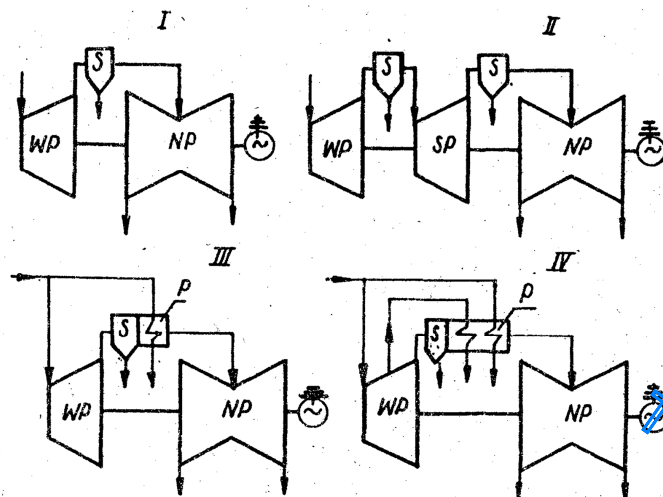
- - - proces rozprężania pary w przypadku konwencjonalnego odwodnienia części przepływowej turbiny

— proces rozprężania pary w przypadku zastosowania efektywnej separacji wewnątrzkanalowej

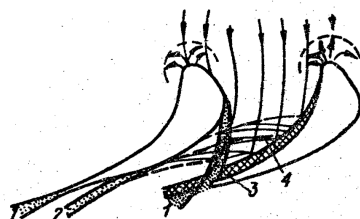
I, II, III, IV



Schemat cieplny typowych konfiguracji siłowni na parę nasyconą



Ruch dużych kropli wody oraz poprzedzający ich powstanie ruch filmu wodnego ma bardzo duże znaczenie na powstawanie erozji i strat w układzie przepływowym a także na separację i możliwość odprowadzenia wilgoci z układu przepływowego turbiny.



Rys.2.3. Schemat przepływu filmu i dużych kropli wody przez kanał międzyłopatkowy wieńca kierowniczego przy osiowym napływie na wieńiec: 1 - strumień kropli w śladzie aerodynamicznym krawędzi spływu; 2 oraz 3 - strumienie kropli powstałe w wyniku oderwania filmu wodnego; 4 - strumienie kropli odbitych

W bardzo złożonym zespole strat, związanych z przepływem pary mokrej przez stopień, wyróżnić można dwie zasadnicze grupy strat, o odmiennym charakterze:

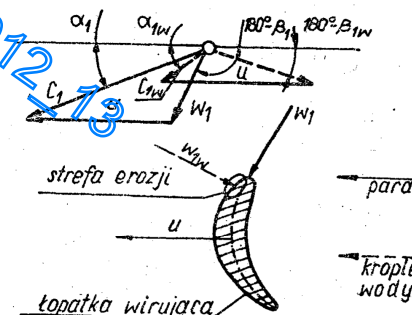
- straty o charakterze termo-dynamicznym,
- straty o charakterze przepływowym.

Praca turbiny w obszarze pary mokrej

Pracy turbiny w obszarze pary mokrej towarzyszą dodatkowe straty energii, silnie zmniejszające sprawność wewnętrzną, w stosunku do sprawności osiąganą przy pracy w obszarze pary przegrzanej oraz zagrożenie uszkodzenia części przepływowej, głównie łopatek wirujących, na skutek erozji.

Przy przepływie pary mokrej przez część przepływową turbiny, faza ciekła, pojawiająca się w wyniku kondensacji, występuje następnie w trzech głównych postaciach:

- w formie mgły (bardzo małe krople),
- w formie filmu, to jest warstewek wody płynących po powierzchniach części przepływowej,
- w postaci dużych kropli a nawet strumieni wody.



Rys.2.4. Wlotowy trójkąt prędkości pary i kropli wody, ilustrujący kinematykę uderzenia kropli o łopatkę wirującą (indeks w dotyczy kropli wody)

Wzajemne oddziaływanie kropli i pary niekorzystnie zmienia też ogólną kinematykę przepływu, niezgodność trajektorii i prędkości kropli wody i fazy parowej jest przyczyną uderzeń kropli o elementy części przepływowej, głównie łopatki, wobec dostosowania kinematyki stopni turbinowych głównie do wymagań przepływu fazy parowej. Z uderzeniami tymi związane są straty bezpośredniego hamowania wirnika oraz erozja.

Pierwszą grupę stanowią straty o charakterze termodynamicznym, związane głównie z bardzo dużą szybkością, z jaką zachodzi proces rozprężania pary w turbinie. Odmienne niż w zakresie pary przegrzanej, gdzie praktycznie występuje równowaga termodynamiczna, w zakresie pary mokrej, szczególnie w pobliżu krzywej granicznej, równowagi takiej brak. W omawianych stanach nierównowagowych, para jest przechłodzona o ΔT , wobec nienadążania procesów kondensacji za szybkimi zmianami ciśnienia rozprężanej pary. Zachodzi przy tym relacja:

$$\Delta T = T_n - T_p > 0,$$

gdzie: T_n - oznacza temperaturę nasycenia odpowiadającą aktualnemu ciśnieniu pary pp; T_p - jest aktualną temperaturą pary.

Przechłodzenie pary może być znaczne 20-40°C, przy czym zmniejsza ono izentropowy (rozporządzalny) spadek entalpii. Przejście do stanu bliskiego równowadze termodynamicznej zachodzi zwykle gwałtownie z czym związany jest przyrost entropii i straty energii.

Inne straty omawianej złożonej grupy związane są ogólnie z procesami wymiany masy i ciepła między fazami ciekłą i gazową, zachodzącymi przy znacznej różnicy temperatur, co prowadzi znowu do przyrostu entropii i strat.

Drugą złożoną grupę stanowią straty o charakterze przepływowym, związane głównie z odmiennymi prędkościami i trajektoriami fazy ciekłej i parowej oraz wzajemnym oddziaływaniem tych faz w przepływie.

Faza ciekła w formie mgły porusza się zasadniczo zgodnie z fazą parową, nie wywołując istotniejszych strat ani erozji. Film wodny zmienia profil łopatek, pogrubia ich krawędź spływu, a przy odpowiedniej grubości filmu pojawiają się na nim fale, co jest źródłem strat.

Najistotniejsze straty związane są tu z powstaniem i ruchem dużych kropeł. Krople te tworzą się głównie w wyniku rozrywania filmu spływającego z łopatek, co wymaga dostarczenia energii przez fazę parową. Dalszego dostarczania energii, kosztem fazy parowej, wymaga przyspieszanie (przez siły tarcia na powierzchni rozdziału faz) i ruch tych kropeł, przy czym prędkość kropeł jest zawsze mniejsza od prędkości fazy parowej. Wzajemne oddziaływanie kropeł i pary niekorzystnie zmienia też ogólną kinematykę przepływu, niezgodność trajektorii i prędkości kropeł wody oraz fazy parowej jest przyczyną uderzeń kropeł o elementy części przepływowej, głównie łopatki, wobec dostosowania kinematyki stopni turbinowych głównie do wymagań przepływu fazy parowej, z uderzeniami tymi związane są straty bezpośredniego hamowania wirnika oraz erozja.

Erozja łopatek i obniżenie sprawności stopni pracujących w obszarze pary mokrej zmuszają do ograniczenia dopuszczalnej wilgotności pary w turbinie do $x > 0,85 - 0,9$.

Wpływ obu grup strat łącznie na zmniejszenie sprawności stopnia turbinowego ocenić można przy pomocy zależności:

$$\eta_{ix} = \eta_i \cdot x$$

gdzie:

η_{ix} - oznacza sprawność wewnętrzną stopnia pracującego z parą mokrą,

η_i - sprawność wewnętrzną tegoż stopnia w obszarze pary przegrzanej,

x - stopień suchości pary.

Dokładniejsze wyniki daje zależność:

$$\eta_{ix} = \eta_i - \Delta \eta_{ix}; \Delta \eta_{ix} = k [a_1 (1 - x_0) + a_2 (x_0 - x)]$$

gdzie:

$k = u/(2H)^{0.5}$ - wskaźnik prędkości stopnia turbinowego;

x, x_0 - stopień suchości pary na wlocie i wylocie ze stopnia turbinowego;

a_1, a_2 - współczynniki, zależne od typu stopnia i udziału dużych kropeł w masie wody, przy czym zwykle $a_1: 1,4 \div 1,9$ oraz $a_2: 0,7$ W

Erozja łopatek i obniżenie sprawności stopni pracujących w obszarze pary mokrej zmuszają do ograniczenia dopuszczalnej wilgotności pary w turbinie do $x > 0,85 - 0,9$.

Mechanizmy erozji łopatek turbinowych pod wpływem uderzeń kropeł wody stanowią złożony kompleks zjawisk. W trakcie takiego uderzenia powstaje szereg efektów mechanicznych, termicznych, chemicznych, kawitacyjnych, elektrycznych, prowadzących do uszkodzenia erozyjnego. W wyniku erozji obserwuje się jakby wyszczerbienie metalu łopatki, powierzchnia jej staje się nierówna, gąbczasta, z wystęпами i kraterami. Erozji podlega głównie krawędź natarcia łopatki po stronie grzbietowej w górnej części łopatki, to jest w obszarze występowania największych kropeł wody i największych prędkości obwodowych. Obserwacje eksploatacyjne wskazują, że erozja może obejmować znaczną część profilu, nawet $0,2 \div 0,3$ cięciwy. Podkreślić należy, że nawet nieznaczne zużycie erozyjne zmienia dynamiczne i wytrzymałościowe charakterystyki łopatek, co może być przyczyną ich złamania, a także zmniejsza sprawność stopnia.

Dla utrzymania maksymalnej wilgotności pary we wskazanych, dopuszczalnych granicach, niezbędny jest dobór odpowiednich parametrów pary i schematu cieplnego turbiny. Zapobieganie i ochrona łopatek przed erozją jest tu podstawowym warunkiem zapewnienia normalnej eksploatacji turbiny. **Stosowane w tym celu zabiegi podzielić można na dwie grupy związane z czynną lub bierną obroną przeciw erozji.**

W grupie zabiegów związanych z czynną obroną przeciw erozji, wyróżnić należy poniższe zasadnicze drogi postępowania.

Zmniejszenie wilgotności pary przed stopniem y_0 , co osiąga się przez dobór odpowiednich parametrów pary i schematu cieplnego turbiny:

- podwyższenie temperatury pary dolotowej do turbiny i obniżenie ciśnienia tej pary,
- wprowadzenie międzystopniowego przegrzewu pary,
- obniżenie ciśnienia pary wtórnie przegrzanej,
- stosowanie bardziej efektywnych zewnętrznych separatorów wody
- pogorszenie próżni za turbiną.

Zmniejszenie wilgotności pary przed wieńcem wirującym.

- wewnątrzkanałowa separacja i odprowadzenie wody bezpośrednio z części przepływowej.

Zmniejszenie energii uderzenia kropeł o łopatkę wirującą.

- powiększenie szczeliny osiowej pomiędzy łopatką kierowniczą a wirującą w górnej części stopnia. Powiększenie tej szczeliny sprzyja zmniejszeniu różnicy między prędkością pary w_1 i kropeł wody w_{1w} . Krople wody ulegają przy tym pewnemu rozdrobnieniu, ułatwiona jest ich separacja.

Zmniejszenie prędkości obwodowej u_{\max} wierzchołka łopatki. Ponieważ przy tym nie powinna zmniejszyć się sumaryczna powierzchnia wylotu turbiny, zmniejszeniu prędkości u towarzyszyć powinno zwiększenie liczby wylotów, zastosowanie wylotu Baumana lub obniżenie prędkości obrotowej turbiny.

Obrona bierna przeciw erozji łopatek polega na stosowaniu odpowiednich materiałów, odpornych na niszczące działanie uderzeń kropeł wody. Poszczególne wytwórnie turbin stosują przy tym różne zabiegi jak:

- wykonanie całej łopatki wirującej z materiału o dużej odporności na erozję;
- zastosowanie w najbardziej zagrożonych miejscach łopatki nakładek z materiałów o dużej odporności na erozję, nie przydatnych jednak dla wykonania z nich całej łopatki; nakładki te są w różny sposób mocowane do łopatki np. przez napawanie lub lutowanie;

Wewnętrzna separacja wody

Dla separacji wody bezpośrednio w układzie przepływowym turbiny wykorzystać można:

- odsysanie filmu wodnego do wnętrza odpowiednio skonstruowanej powłokowej łopatki kierowniczej lub odsysanie przez specjalne otworki przy wierzchołku łopatki kierowniczej. Zabieg ten szczególnie skutecznie zmniejsza erozję łopatek wirujących
- separujące działanie sił odśrodkowych związane z różną gęstością kropeł wody i strumienia pary, co umożliwia wychwytywanie kropeł do specjalnych kanałów przy wierzchołkach łopatek; zabieg ten jest możliwy w szczelinie międzywieńcowej jak i za wieńcem wirującym;
- silne działanie sił odśrodkowych na cząstki wody znajdujące się na powierzchni łopatki wirującej dla odrzucenia ich na zewnątrz i następnego wydalenia z układu przepływowego; zasada ta jest Wykorzystywana, między innymi w "stopniach-separatorach" specjalnej konstrukcji.

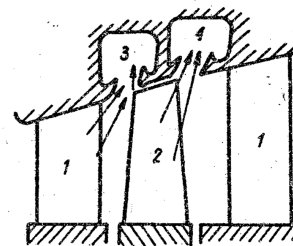
Dla separacji wody bezpośrednio w układzie przepływowym turbiny wykorzystać można

- wymuszone odsysanie mieszaniny parowo-wodnej w połączeniu z separującym działaniem sił odśrodkowych (np. upusty regeneracyjne).

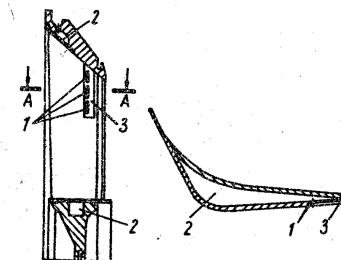
Zależnie od miejsca, z którego wyprowadzana jest zebrana woda wyróżnić można 4 sposoby separacji i usuwania wody z układu przepływowego turbiny:

- z wnętrza powłokowych łopatek kierowniczych, lub z komór przy wierzchołku łopatki kierowniczej,
- z komory za wieńcem kierowniczym w szczelinie międzywieńcowej,
- z kanałów lub komór nad wieńcem wirującym, do których odrzucają krople wody "ząbkowane" łopatki wirujące lub specjalne "stopnie - Separator",
- komory lub kanały za wieńcem wirującym.

Separacja wilgoci w układzie łopatkowym

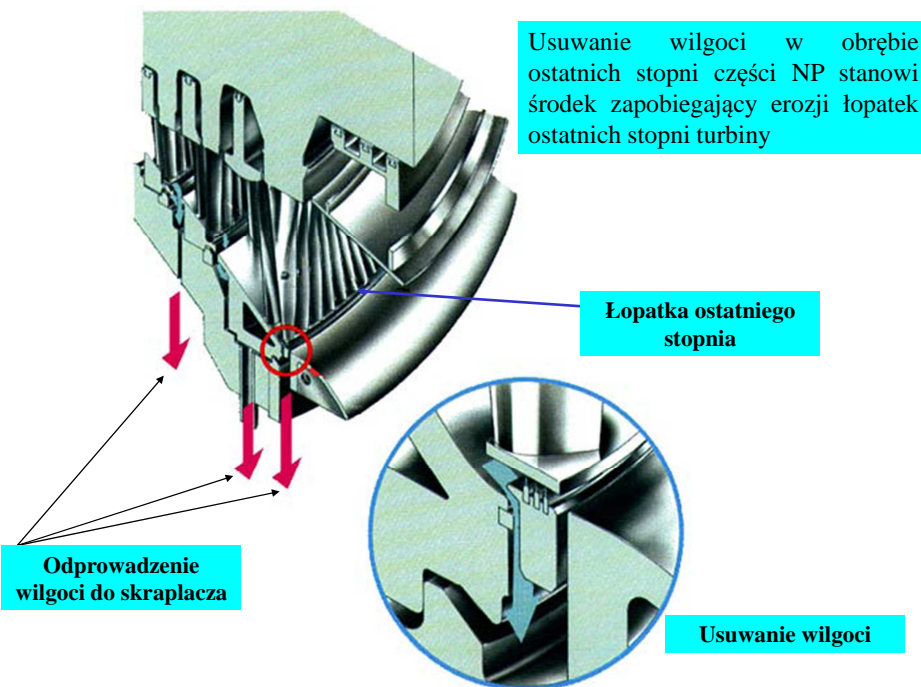


Rys.4.6. Schemat stopnia z urządzeniami dla separacji wody: 1 - łopatka kierownicza, 2 - łopatka wirująca, 3 - komora zbiorcza wody separowanej w szczelinie międzywieńcowej, 4 - komora zbiorcza za wieńcem wirującym; strzałkami zaznaczono kierunek ruchu dużych kropli wody



Rys.4.7. Schemat tarczy kierowniczej z łopatkami powłokowymi wytłorni HTGZ: 1 - otwórki dla odsysania filmu wodnego do wnętrza łopatki, 2 - kanały zbiorcze, 3 - podcięcie wychwytyjące film

Turbiny_Parowe_2012_73



Dobre właściwości antyerozyjne mają stale austenityczne, szeroko stosowane w produkcji łopatek, szczególnie w połączeniu ze specjalną obróbką powierzchniową krawędzi natarcia. Jeszcze lepsze właściwości posiadają stopy tytanu. Nakładki ze stali, przy właściwym ich połączeniu z łopatką, znacznie ułatwiają ochronę przed zniszczeniem erozyjnym.

Odmiennym zabiegiem jest wykonywanie rowków w grzbietowej części krawędzi natarcia łopatki. Powstała w ten sposób łopatka ząbkowana mająca zdolność do separacji fazy ciekłej oraz, dzięki powstawaniu w rowkach jakby poduszki wodnej, przejmującej uderzenia kropli, znacznie podwyższoną odporność na zużycie erozyjne.

Effective and proven measures against droplet erosion available

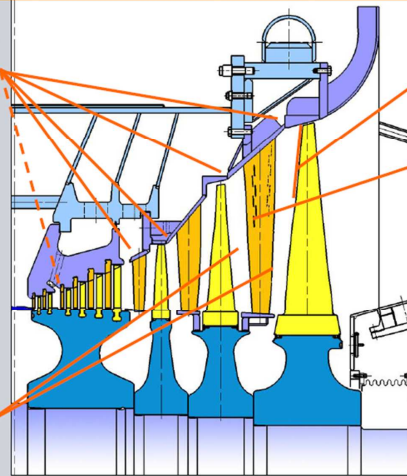
Reduction of water by:
- Extraction slots/drainage

Active protection by
Leading-edge hardening
(flame or laser hardening)

Reduction of water by:
- hollow stator blade with
suction slots
- or heating of blade

Suction slots

Small droplets by
- axial gap design
- thin trailing edge



Efektywność układu separacji wewnętrznej oceniana jest przy pomocy wskaźnika ψ , nazywanego stopniem separacji.

$$\psi = \frac{G_x}{G_w}$$

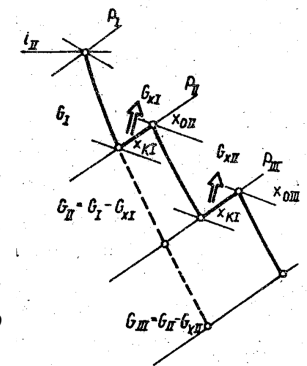
G_x - natężenie masowe przepływu wody separowanej w rozpatrywanym stopniu,

G_w - natężenie masowe przepływu wody zawartej w parze wilgotnej na wylocie ze stopnia bez separacji

W wyniku tej separacji stopień suchości pary przed następnym stopniem turbiny wzrasta do wartości x_0 , wynikającej z zależności:

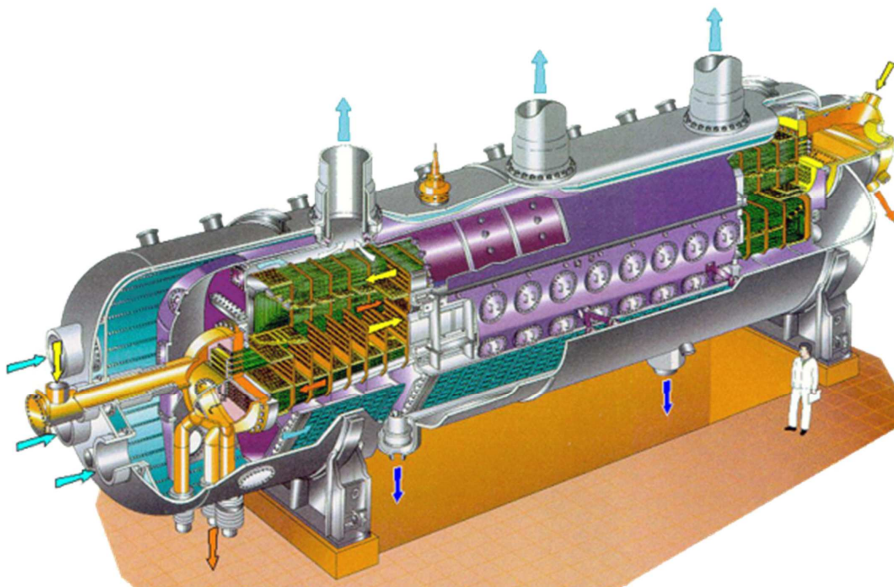
$$x_0 = x_k + \psi(1 - x_k)$$

x_k - oznacza stopień suchości pary na wylocie ze stopnia bez uwzględnienia separacji.

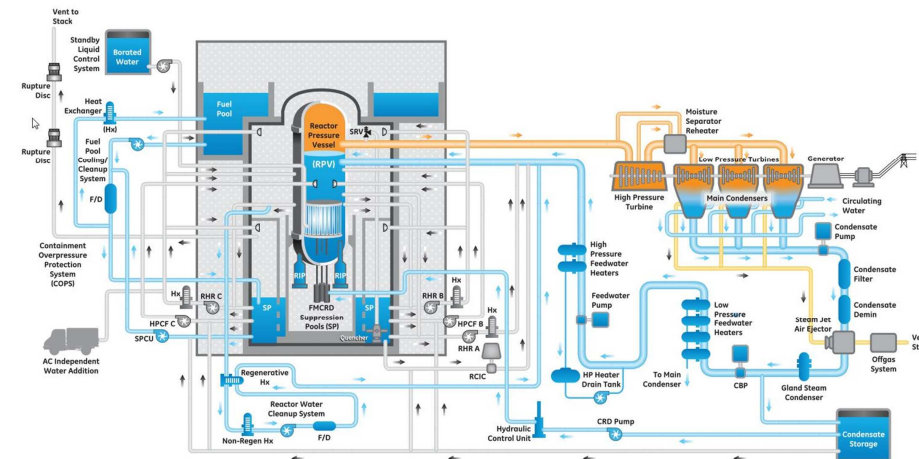


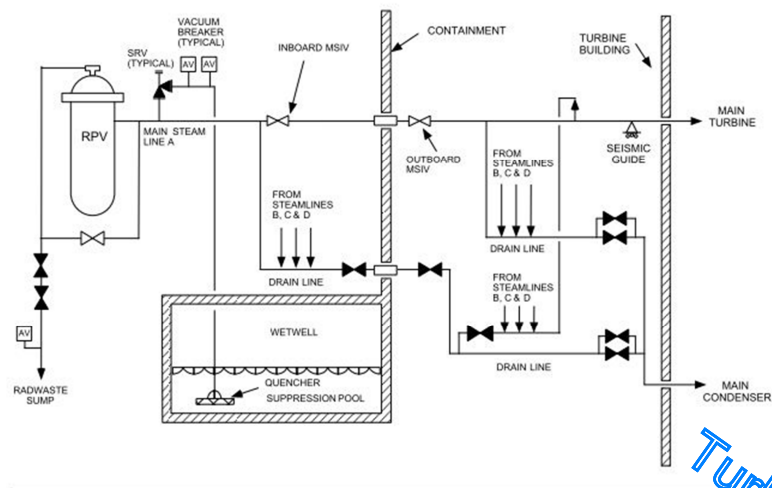
Rys.4.8. Schemat procesu rozprężenia pary w grupie trzech stopni wyposażonych w układ dla separacji i odprowadzenia wody z części przepływowej; linią przerywaną zaznaczono przebieg procesu bez separacji

Schemat bloku jądrowego z reaktorem BWR – układ powiązany z turbiną

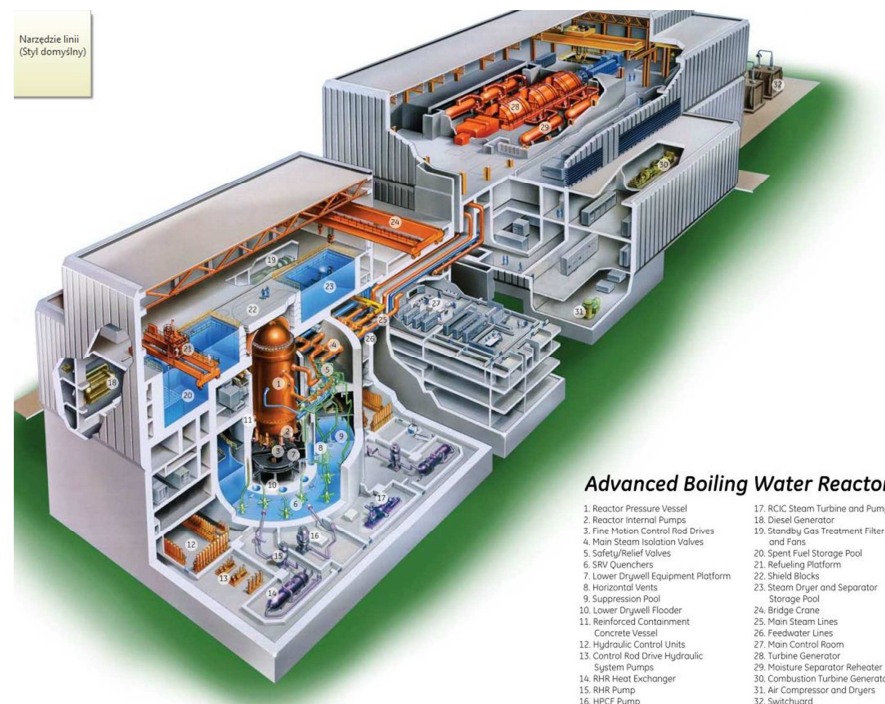


Separator przegrzewacz pary elektrowni jądrowej (ALSTOM)

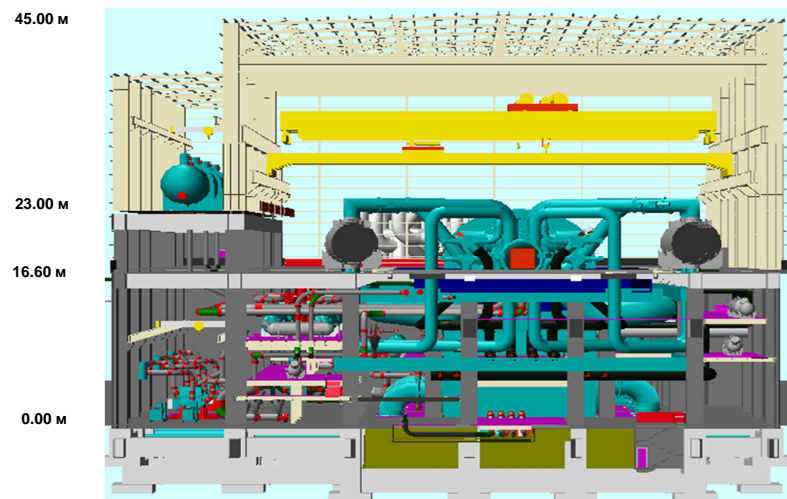




Turbiny_Parowe



Widok maszynowni bloku jądrowego z reaktorem PWR (ALSTOM)



Bardzo wysokie zapotrzebowanie bloku jądrowego na wodę chłodzącą

Blok klasy 1200 MW zużywa 30 do 70 m³/s, w zależności od warunków lokalnych

Typowa wysokość podnoszenia pomp 7 do 20 m dla chłodzenia bezpośredniego oraz od 15 do 30 m dla chłodni

Zużycie energii przez pompy wody chłodzącej stanowi od 0.5% do 1.5% mocy bloku jądrowego

Wysoki koszt układów chłodzenia i istotny wpływ na sprawność bloku