

# PRZEGLĄD TECHNICZNY

TYGODNIK POŚWIĘCONY SPRAWOM TECHNIKI I PRZEMYSŁU.

## TREŚĆ:

- Uwagi o obecnych typach turbin parowych, nap. Dr. Inż. W. Chrzanowski, Profesor Politechniki Warszawskiej.
- O budowie turbin parowych w Polsce, nap. Dr. Inż. W. Borowicz, Profesor Politechniki Lwowskiej.
- Nowsze konstrukcje turbin parowych, nap. Inż. Z. Ficki.
- Wyrób turbin parowych, nap. Inż. E. T. Geisler, Profesor Politechniki Lwowskiej.
- Zapotrzebowanie na turbiny parowe na polskim rynku elektrotechnicznym, nap. Inż. W. Rosental.
- O możliwości wytwarzania turbin parowych w Polsce, nap. Inż. Prof. Z. Sochacki.
- Możliwości budowy w Polsce turbin parowych, nap. Inż. Z. Okoniewski.
- Konferencja turbinowa Stow. Inżynierów Mechaników Polskich.
- Przegląd pism technicznych.
- Bibliografia.

## SOMMAIRE:

- Sur les progrès réalisés dans la construction des turbines à vapeur, par M. W. Chrzanowski, Dr. Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Varsovie.
- Développement de la construction des turbines à vapeur et leurs types correspondant aux besoins de l'industrie polonaise, par M. W. Borowicz, Dr. Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Léopol.
- Les nouveaux types des turbines à vapeur, par M. Z. Ficki, Ingénieur.
- Procédés de la fabrication des turbines à vapeur, par M. E. T. Geisler, Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Léopol.
- La demande des turbines à vapeur sur le marché polonais, par M. W. Rosental, Ingénieur.
- Sur la possibilité de la production des turbines à vapeur en Pologne au point de vue technique et commercial, par M. Z. Sochacki, Professeur.
- Conditions de la production des turbines à vapeur en Pologne, par M. Z. Okoniewski, Ing.
- Conférence de la Société des Ingénieurs Mécaniciens Polonais au sujet de la production des turbines à vapeur en Pologne.
- Revue documentaire.
- Bibliographie.

*Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników Polskich zorganizowało niedawno (jak już donosiliśmy poprzednio) Konferencję fachowców, mającą na celu rozważenie potrzeby i możliwości rozpoczęcia budowy turbin parowych w Polsce. Chcąc udostępnić szerszemu ogółowi interesujące materiały zebrane przez Konferencję, zarówno w postaci referatów jak i przemówień w dyskusji, oraz utrwalić w ten sposób pożyteczną inicjatywę podjętą przez nowe stowarzyszenie techniczne, wydajemy w zeszycie niniejszym plony odbytego zebrania, uzupełnione jeszcze dodatkowo opracowaniami artykułami z zakresu konstrukcji nowoczesnych turbin.*

REDAKCJA.

## Uwagi o obecnych typach turbin parowych.

Napisał Dr. Inż. W. Chrzanowski, Profesor Politechniki Warszawskiej.

**W** Polsce nie buduje się dotychczas turbin parowych, pomimo że zapotrzebowanie ich u nas wciąż wzrasta, gdyż są one najodpowiedniejszym silnikiem cieplnym do wytwarzania wielkiej mocy. Niezależnie od tego, że w dziedzinie turbin parowych jesteśmy tylko odbiorcami towaru obcego, musimy starannie śledzić postępy w budowie tych silników, aby przy zamawianiu ich nie popełnić omyłek, które później mogą spowodować nie tylko duże koszty, lecz także i wielkie niedogodności w ruchu przedsiębiorstwa. Nie można dopuścić do tego, aby wytwórnia zagraniczna dostarczyła nam lichego towaru eksportowy, a nawet silnik nieodpowiadający warunkom, w których ma pracować. Ostatni wypadek może zająć łatwo, ponieważ wytwórnie zagraniczne często nie mają możliwości dostatecznego zbadania warunków pracy zamawianego silnika, a przedstawicielstwa ich często nie posiadają inżynierów, należycie obeznanych z budową turbin parowych.

Rynek zbytu turbin parowych jest prawie całkowicie opanowany przez turbiny osiowe o układzie poziomym, t. j. silniki, w których para przepływa przez wieniec łopatkowe wirników równolegle do poziomu ułożonego wału turbiny. Taką stan można tłumaczyć sobie następującymi przyczynami: turbiny osiowe powinny według ludzkich przy-

puszczeń pracować więcej niezawodnie od promieniowych, budowę ich można z większą łatwością dostosować do wysokich ciśnień i temperatur, które w nowych instalacjach są prawie wyłącznie używane, — a w końcu słusznym zapatrywaniem odbiorców, że turbina osiowa jest prostsza w swej budowie od promieniowej, skutkiem czego w razie jakichkolwiek niedomagań może łatwiej być skontrolowana przez mechanika miejscowego.

Turbiny osiowe mogą być systemu akcyjnego lub reakcyjnego. Wybór pomiędzy temi systemami sprawia odbiorcy, nieobeznane z ich właściwościami, nieraz dużo kłopotu, zwłaszcza że sprzedający przedstawiciele fabryk turbin parowych starają się wady to jednego, to drugiego systemu, przedstawić kupującemu w sposób odstrasający. W rzeczywistości nie można jakości turbin parowych oceniać podług tego, czy turbina jest akcyjna — czy też reakcyjna, tylko podług jej budowy i fabrykatu, bo tak jeden, jak i drugi system ma swoje zalety, w odpowiednim miejscu zastosowany; znawca turbin parowych nie ocenia też ich jakości podług oddanych gwarancji zużycia pary, ponieważ wie, że gwarancje te nie zawsze są dotrzymywane, a pomiary odbiorcze przeprowadzane są w warunkach wyjątkowo korzystnych.

Np. jeśli ma być ustawiona turbina o bardzo wielkiej mocy, pracująca z kondensacją przy ciśnieniu dolotowym poniżej 20 *atn*, której obciążenie waha się nieznacznie, to z powodu zapotrzebowanej wielkiej ilości pary można tutaj zastosować system wyłącznie reakcyjny. W wysokopięrnej części tej turbiny otrzymuje się bowiem łopatkę już o takiej długości, która pozwala bez uszczerbku sprawności turbiny na zastosowanie dużych szczelin pomiędzy łopatkami wirnikowymi i kadłubem, dzięki którym osiąga się zupełną niezawodność silnika; — oczywiście w celu podniesienia ostatniej wykonywa się w takich wypadkach turbinę o dwóch kadłubach. Natomiast, jeśli ma być zakupiona turbina, której para wylotowa ma być użytą do celów ogrzewania pośredniego, to nie można brać turbiny wyłącznie reakcyjnej, bo w systemie tym można stosować tylko regulację jakościową, t. j. przez dławienie pary dolotowej. Ponieważ w ruchu obciążenie silnika często spada poniżej normalnego, przeto z powodu dławienia pary dolotowej uchodzi z turbiny para przegrzana, która z powodu złego przewodnictwa ciepła jest niewłaściwą do celów pośredniego ogrzewania, wskutek czego powstają często znaczne trudności przy fabrykacji towaru, do której używa się pary z turbiny o budowie niewłaściwej.

### Obecny stan budowy osiowych turbin parowych.

Obecny stan budowy osiowych turbin parowych można scharakteryzować jako okres powstawania nowych typów turbin.

Dawne typy osiowych turbin parowych o dużej mocy, które prawie wyłącznie panowały aż do roku 1922, zniknęły prawie zupełnie. Cechą charakterystyczną tych turbin była budowa silników możliwie krótkich, składających się z koła Curtis'a, jako części wysokopięrnej, i z krótkiej turbiny akcyjnej lub reakcyjnej, jako części niskopięrnej, lub też składających się z niewielkiej liczby kół akcyjnych o wielkiej średnicy; — wszystkie wirniki umieszczone były tylko w jednym kadłubie. Pod wpływem dążności do osiągnięcia mniejszego zużycia jednostkowego pary, propagowanych na kontynencie europejskim w szczególności przez Pierwszą Berneńską Fabrykę, prawie wszystkie wytwórnie, przodujące w budowie turbin parowych, przeszły w latach 1922 do 1925 do budowy turbin o wielkiej liczbie wirników, posiadających mniejsze średnice, ze względu na zachowanie korzystnego stosunku  $u : c_1$ ; w wielu wypadkach wirniki umieszcza się w dwóch lub trzech kadłubach. Ten podział, spowodowany pierwotnie względem poprzednio zaznaczonym, okazał się bardzo wskazanym przy zastosowaniu wyższych ciśnień i temperatur pary dolotowej, aby uzyskać przez uproszczoną budowę poszczególnych mniejszych kadłubów turbiny większą jej niezawodność ruchu, t. j. uniknąć odkształcenia i pęknięcia kadłubów.

W okresie tym, od r. 1922 do 1925, koło Curtis'a było, jako element pracujący nieekonomicznie, zupełnie zaniedbane, czyli nie stosowane w turbinach. Obecnie większość fabryk przodujących powróciła znów do koła Curtis'a w większości budowanych typów turbin, ponieważ posiada ono trzy cenne zalety, mianowicie:

1) do kadłuba turbiny dopływa para o niższym

ciśnieniu i niższej temperaturze, co także korzystnie wpływa na dławnicę wysokopięrzną,

2) turbina z kołem Curtis'a, jako częścią wysokopięrzną, pracuje ekonomicznie przy zmiennym obciążeniu,

3) przez rozprężanie pary w kole Curtis'a, częściowo zasilaniem, uzyskuje się nawet w turbinach o mniejszej mocy (ok. 1000 *kW*), pracujących z dość dużym ciśnieniem pary dolotowej (ok. 22 *atn*) tak dużą objętość pary, która pozwala na zasilanie na całym obwodzie następnych wirników akcyjnych lub reakcyjnych, przy otrzymaniu dostatecznie dużej wysokości łopatek.

Typy turbin, obecnie najczęściej używane na kontynencie europejskim, można omówić najlepiej według rodzaju ich pracy.

Najwięcej rozpowszechnione są turbiny, pracujące z kondensacją. Z nowoczesnej budowy ucierają się w tym dziale następujące typy.

#### I. Turbiny jednokadłubowe.

Turbiny jednokadłubowe buduje się dla średniej mocy od 500 aż do 10 000 *kW* przy  $n = 3\,000$  obr/min w tych wypadkach, w których więcej zależy na zmniejszeniu kosztów silnika, niż kosztów paliwa. Przy ciśnieniu dolotowym aż do 22 *atn* i 400° C wykonywa się je obecnie jako połączenie koła Curtis'a z wielostopniową turbiną reakcyjną lub jako połączenie koła Curtis'a z trzema wirnikami akcyjnymi i z wielostopniową turbiną reakcyjną. Ze względu na uzyskanie lepszej sprawności turbiny, włączenie kilku kół akcyjnych pomiędzy koło Curtis'a i niskopięrzną część reakcyjną jest bardzo pożądane, zwłaszcza w turbinach o mniejszej mocy, ponieważ pozwala na stosowanie niezbyt daleko posuniętego rozprężania pary w kole Curtis'a (mniej więcej aż do ciśnienia krytycznego) przy zachowaniu dobrej sprawności i dużej niezawodności ruchu części niskopięrnej turbiny. Mniejsze prędkości pary w kole Curtisa wpływają też korzystnie na trwałość jego łopatek.

W celu uzyskania lepszej sprawności koła Curtisa i kół akcyjnych tego typu, stosuje się w nich t. zw. łopatki okręcone, t. j. łopatki o różnych kątach wlotowych i wylotowych, oraz dość często pewien stopień reakcyjności. Ostatni wymaga przy kole Curtis'a uszczelnienia kierownic przy piąście wirnika, skutkiem czego koło to posiada kształt litery U lub składa się z dwóch wirników. Również ze względu na zmniejszenie zużycia pary używa się obecnie, nawet przy niezbyt dużej wysokości, t. zw. łopatek zwiniętych, których kąty są dostosowane do prędkości obwodowej poszczególnych części łopatek.

Stosowanie dla powyżej wspomnianej mocy i ciśnienia turbin, składających się z koła Curtisa i z wielostopniowej turbiny akcyjnej, nie daje tak dobrych wyników pod względem zużycia pary, jak typy poprzednio omówione. Sprawność niskopięrnej części akcyjnej o stosunkowo mniejszej liczbie stopni ciśnienia jest bowiem gorsza, niż niskopięrnej części reakcyjnej o bardzo dużej liczbie stopni ciśnienia, a powiększenie liczby stopni ciśnienia w systemie akcyjnym powoduje znacznie większy wzrost kosztów budowy, niż w systemie reakcyjnym.

Jeszcze obecnie budowane przez niektóre wytwórnie turbiny akcyjne lub akcyjno-reakcyjne, składające się z niewielkiej liczby wirników (6 do

10), o dużych średnicach, skutkiem czego pierwsze kilka wirników posiada zasilanie parą na części obwodu, nie mogą oczywiście dać w ruchu tak dobrych wyników pod względem zużycia pary, jak typy nowoczesne. Również pod względem niezawodności biegu można je stosować z powodzeniem tylko przy mniejszym ciśnieniu pary dłotowej (ok. 16 *atn*) i mniejszej mocy. Turbiny kondensacyjne tego rodzaju o mocy bardzo dużej (np. 40 000 *kW* przy  $n = 1500$  obr./min) przy dużym ciśnieniu dłotowym, 23 *atn* i 375° C, zawiodły w ruchu nie tylko pod względem zużycia pary, lecz także pod względem trwałości kadłuba, podlegającego przy dużych jego wymiarach działaniu bardzo dużej różnicy temperatur.

Jednokadłubowe turbiny promieniowe składające się tylko z dwóch przeciwbieżnych wirników, wymagające użycia dwóch generatorów elektrycznych, znajdują stosunkowo mało zwolenników, pomimo że sam pomysł jest bardzo interesujący. Trudno bowiem zdobyć przekonanie, iż będą one pracowały stale niezawodnie przy wysokim ciśnieniu i wysokiej temperaturze pary dłotowej.

Z powyższego zestawienia wynika, że dziś unika się stosowania w turbogeneratorach przekładni zębatach, gdzie to tylko jest możliwe. Przekładnia taka posiada wprawdzie dużą sprawność, lecz tworzy element, mogący zmniejszyć niezawodność pracy silnika.

## II. Turbiny wielokadłubowe.

Turbiny wielokadłubowe stosuje się w tych wypadkach, w których zależy na możliwie najmniejszym zużyciu pary i w których ciśnienie pary dłotowej przekracza około 22 *atn*. W ten sposób działanie wysokiego ciśnienia i wysokich temperatur ogranicza się tylko do kadłuba wysokoprężnego.

Wśród turbin dwukadłubowych, budowanych o mocy 3000 do 25 000 *kW* przy  $n = 3000$  obr./min, można ustalić następujące typy:

a) Część wysokoprężną tworzy koło Curtis'a i dość znaczna liczba zasilanych na całym obwodzie kół akcyjnych, w których para pracuje ze stopniem reakcyjności 5% do 15%, — część niskoprężną tworzy wielostopniowa turbina reakcyjna o jedno lub dwukierunkowym przepływie pary.

b) Część wysokoprężną tworzy koło Curtis'a (lub dwa koła akcyjne) i wielostopniowa turbina reakcyjna, — część niskoprężna jest wielostopniową reakcyjną, a para płynie przez ostatnią w kierunku przeciwnym w stosunku do tegoż w części wysokoprężnej. Przy niższym ciśnieniu pary dłotowej i bardzo wielkiej ilości pary spożebowanej przez turbinę, można opuścić koło Curtis'a, jak poprzednio zaznaczono.

c) Część wysokoprężną składa się z kilkunastostopniowej turbiny akcyjnej, a część niskoprężną z kilkostopniowej turbiny akcyjnej.

Pomimo że dotychczas nie zostały opublikowane badania zużycia pary, przeprowadzone przez osoby bezstronne przy silnikach powyższych rodzajów, to można jednak przypuszczać, że typy a) i b) będą mniej więcej równorzędne pod względem zużycia pary, natomiast można mieć poważne wątpliwości, czy typ c) dorówna im w tym względzie. Pod względem niezawodności ruchu, powinny wszystkie trzy typy posiadać jednakowy stopień bezpieczeństwa, o ile tylko wykonanie ich jest prawidłowe; naogół przeważa jednak zapatrywanie, że

w wysokoprężnej części turbiny (kadłub wysokoprężny), osiąga się, zwłaszcza przy dużym ciśnieniu dłotowym, większy stopień bezpieczeństwa przy użyciu w tej części systemu akcyjnego.

W tych wypadkach, w których przy dużym ciśnieniu dłotowym od 25 do 40 *atn* wymagane jest możliwe małe zużycie pary, stosuje się, przy mocy powyżej około 15 000 *kW* (przy  $n = 3000$  obr./min aż do 30 000 *kW*, przy  $n = 1500$  obr./min aż do 50 000 *kW*) także turbiny trzykadłubowe. Wykonywane obecnie w Europie turbiny trzykadłubowe powstają przez dołączenie, w typach omówionych pod a) i b), kadłuba części niskoprężnej o dwukierunkowym przepływie pary, aby uniknąć konieczności stosowania tłoków odciażających i aby móc lepiej opanować wielkie obciążenia pary.

W niektórych wypadkach, w których istniejące turbiny pracują z dość niskim ciśnieniem dłotowym (poniżej ok. 16 *atn*), a są jeszcze w dobrym stanie, poleca się przy rozszerzaniu instalacji ustawić turbiny czołowe, pracujące z ciśnieniem 35 do 40 *atn*, z których para wylotowa zostaje skierowywana do starych turbin. Zaletą takiej rozbudowy są małe koszty instalacyjne, które dziś w rachunku rentowności odgrywają bardzo dużą rolę.

Jako turbiny przeciwpężne o mocy powyżej około 450 *kW* buduje się obecnie przy dużym ciśnieniu dłotowym następujące typy:

- 1) koło Curtis'a w połączeniu z wielostopniową częścią akcyjną,
- 2) koło Curtis'a (lub 2 koła akcyjne) w połączeniu z wielostopniową częścią reakcyjną,
- 3) promieniową turbinę reakcyjną,
- 4) turbinę o dwóch kołach Curtis'a.

Typy podane pod 1) i 2) można, z zastrzeżeniami, podanymi przy rozważaniu turbin kondensacyjnych, uważać za równorzędne. Natomiast typ 3), jako reakcyjny, wymagający regulacji jakościowej, może w wielu wypadkach przy pracy z przeciwpężnością być nieodpowiednim. Nie mniejsze wątpliwości mieć można także co do typu 4), który jest wprawdzie bardzo tani w budowie, lecz którego sprawność w ruchu silnika może w krótkim czasie znacznie zmniejszyć się z powodu dużego zdzierania się łopatek, wywołanego bardzo dużą prędkością pary; zmniejszenie sprawności turbiny powoduje, że para wylotowa, używana do celów fabrykacyjnych, jest więcej przegrzana.

Jako turbiny, pracujące z odbiorem pary do celów fabrykacyjnych, buduje się odpowiednio zmienione typy turbin kondensacyjnych.

Z powyższego opisu wynika, że obecny stan budowy turbin parowych odznacza się dużą różnorodnością. Ostatnia może tworzyć też pewną trudność przy wprowadzaniu u nas wytwórczości turbin parowych. Należy bowiem starać się o to, aby uzyskać licencję na typ najodpowiedniejszy, bo tworzenie nowych typów spowodowałoby zbyt duże koszty biura konstrukcyjnego. Największe trudności napotka jednak wprowadzenie u nas budowy turbin parowych w braku dostatecznych funduszy, które są konieczne do udzielania kupującym długoletniego kredytu o tanim procencie rocznym. Przy umiejętnym jednak postawieniu sprawy licencji, i ta największa trudność może być z powodzeniem opanowana przez niektóre zasobne wytwórnie krajowe.