

straty pary z powodu nieszczelności są bardzo małe, ponieważ koła kierownicze posiadają uszczelnienia i to na małym obwodzie.

Z systemem powyższym połączone są jednakże i pewne strony ujemne. Prędkość pary jest stosunkowo wielka, co powoduje duże obciążenie jednostkowe łopatek. Nadmiernemu zdzieraniu łopatek można przedewszystkiem zapobiedz przez dobór odpowiedniego materiału. Również wirniki turbin o wielkiej mocy, pracujące z wielką prędkością obwodową, muszą być wykonane z materiału najprzedniejszego. Dopływ pary o stosunkowo wysokim ciśnieniu do osłony oddziałuje natomiast niekorzystnie na dławnicę po stronie wysokoprężnej. Opór, spowodowany wentylacją, jest większy niż w turbinie Parsons'a, ponieważ turbina pracuje z częściowym zasilaniem.

Wielostopniowe turbiny akcyjne, zwłaszcza systemu Zoelly'ego, są wykonywane przez fabryki pierwszorzędne, a zdobywają obecnie coraz większe rozpowszechnienie, zwłaszcza jako silniki o wielkiej mocy. Niektóre fabryki, np. „M. A. N.” w Norymberdze, General Electric C-o w Schenectady, które budują dla wytwarzania mocy średniej, aż do około 5000 kW, przeważnie turbiny kombinowane, opisane w § 9 a, stosują wielostopniowe turbiny akcyjne w silnikach o wielkiej mocy, w których łatwiej można ograniczyć częściowe zasilanie do kilku pierwszych wirników. Również fabryka angielska Vickers'a zastępuje w turbinie, przedstawionej na rys. 34, przy niezbyt wielkich spadkach ciśnienia pierwsze koło Curtis'a wirnikiem systemu Rateau'a, otrzymując przez to czystą wielostopniową turbinę akcyjną.

Charakterystyczną dążnością fabryk, należących do syndykatu Zoelly'ego, jest używanie za przykładem przodującej w tej dziedzinie fabryki Escher & Wyss'a możliwie małej liczby stopni ciśnienia, więc dość dużej prędkości pary i prędkości obwodowej wirników. Np. turbiny, pracujące z $n = 3000$ obr/min, o mocy 5000 kW posiadają 8 wirników, o pomocy 10 000 kW — 6 do 7 wirników, a turbiny o mocy 40 000 kW przy $n = 1500$ obr/min — 10 wirników, 7 pierwszych o średnicy 2 m, a 3 ostatnie o średnicy 2,8 m. Inne wytwórnie stosują mniejsze prędkości pary, więc większą liczbę stopni ciśnienia; — np. fabryka Oerlikon dla mocy 5 000 kW przy $n = 3000$ obr/min — 11 wirników, General Electric C-o dla mocy 35 000 kW przy $n = 1500$ obr/min — 22 wirniki o średnicy od około 1 140 mm do 3 000 mm, a długość łopatek ostatniego wirnika wynosi około 700 mm.

Jako dowód wielkiego rozpowszechnienia wielostopniowych turbin akcyjnych można przytoczyć, że wielka centrala elektryczna w Gennevilliers pod Paryżem o mocy maksymalnej 320 000 kW zostaje obecnie zaopatrzona w 8 turbin Zoelly'ego o mocy po 40 000 kW ($n = 1500$ obr/min, para admissyjna 22 atm. nadciśn. i 375° C), zbudowanych przez fabryki Escher, Wyss & C-o w Zurychu, Schneider & C-o w Creusot i La Société Alsacienne w Belfort.

§ 8. Turbiny akcyjne o stopniowaniu prędkości.

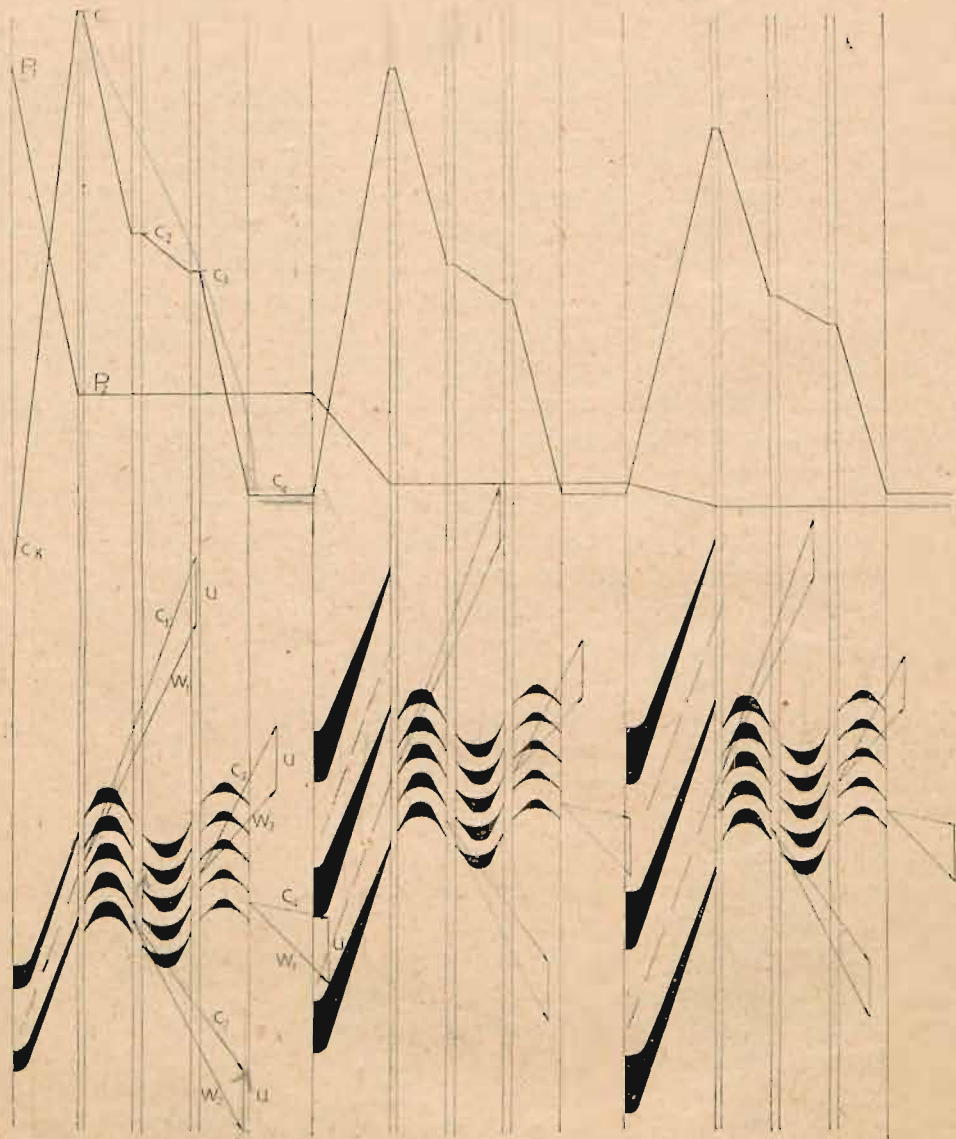
Najwięcej rozpowszechnione turbiny tego rodzaju są opisane w § 8-a, § 8-b i § 8-c.

§ 8-a. Turbina Curtis'a.

Wynalazca powyższego systemu, Amerykanin Curtis, podzielił cały spadek ciśnienia, zależnie od wielkości turbiny, tylko na 2 do 5 stopni ciśnienia. W celu zmniejszenia wylotowej prędkości pary z wirnika, która np. w turbinie de Laval'a przy zmniejszaniu jej prędkości obwodowej powiększałaby się znacznie, czyli w celu dobrego wyzyskania pary przy niezbyt wielkich prędkościach obwodowych wirników, Curtis umieścił na

każdym wirniku dwa lub trzy wieńce łopatkowe, a pomiędzy nimi wieńce łopatek kierowniczych, w których jednak para nie rozpręża się. Średnice wirników są dość duże, skutkiem czego stosować należy częściowe zasilanie wirników.

Wyniki, uzyskane przy powyższym ustroju turbiny, uwidocznia schematycznie rys. 20, w którym oznaczono przez c bezwzględne prędkości pary, przez w względne prędkości



Rys. 20.

kości pary, przez u prędkości obwodowe wirników, przez p prężności pary. Turbina jest osiową i posiada tutaj trzy stopnie ciśnienia, a każdy z tych stopni po dwa wieńce wirników, czyli po dwa stopnie prędkości.

Rozważmy pierwszy stopień ciśnienia. Para świeża rozpręża się w dyszach, pomieszczonych przed pierwszym wieńcem wirnika z ciśnienia p_1 na p_2 , uzyskując prędkość c_1 , którą rozkładamy na u i w_1 . Z powodu strat tarcia, w_2 jest mniejsze od w_1 . Z w_2 znajdujemy przy pomocy u prędkość c_2 , z którą para wchodzi do kierownicy. Tutaj na-

stępuje zmiana kierunku prądu pary bez dalszej ekspansji. Z powodu strat przy przepływie przez wieniec kierowniczy zmniejsza się c_2 na c_3 , z którego znajdujemy po odłożeniu u prędkość w_3 . Ostatnia zmniejsza się w drugim wieńcu wirnikowym na w_4 , które rozkładamy na u i bezwzględną prędkość wylotową c_4 . W drugim i trzecim stopniu ciśnienia para pracuje w sposób analogiczny.

Przez umieszczenie pomiędzy dwoma wiencami wirnika jednego wienca łopatek kierowniczych, Curtis zmniejsza bardzo znacznie prędkość wylotową pary (zamiast c_2 uzyskuje c_4). Skutkiem tego może nawet przy kilku tylko stopniach ciśnienia i niezbyt wielkich średnicach wirników uzyskać liczbę obrotów wału turbinowego, która pozwala na bezpośrednie połączenie z generatorem elektrycznym.

Turbinę Curtis'a określa się jako kilkostopniową osiową turbinę akcyjną o kilku stopniach prędkości. Energja kinetyczna, uzyskana przez spadek ciśnienia w jednym stopniu dysz, wytwarza pracę w dwóch po sobie następujących wienicach wirników przy tem samym ciśnieniu pary, oczywiście w wieńcu pierwszym pracę znacznie większą niż w drugim. Prędkość wlotowa c_1 jest tutaj większa niż w wielostopniowych turbinach akcyjnych, co wpływa ujemnie na współczynnik sprawności turbin i zużywanie się łopatek.

W celu zmniejszenia wielkiej prędkości pary, która powstaje przy wyłącznej ekspansji w dyszach, niektóre fabryki stosują czasem w turbinach Curtis'a mały stopień naporności, uzyskując przez to zmniejszenie spostrzebowania pary, pomimo strat z powodu nieszczelności. Różnica pomiędzy ciśnieniem pary przed pierwszym wieńcem wirnika a ciśnieniem przy opuszczaniu drugiego wienca jest jednakże mała, tak że dalsza ekspansja odbywa się przedewszystkiem w wieńcu pierwszym, znajdującym się obok dysz. Turbiny tego rodzaju można więc zaliczyć także do akcyjnych.

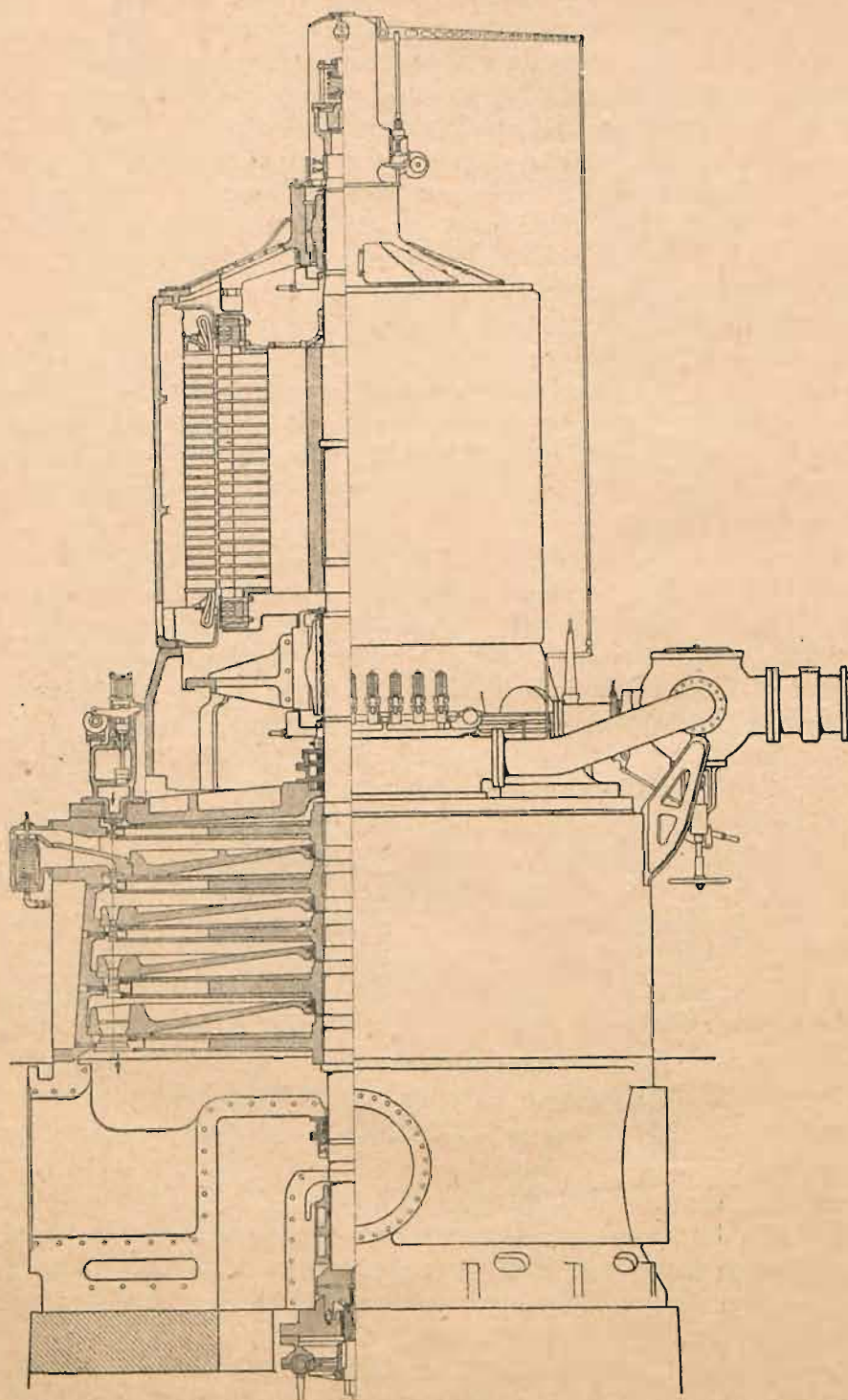
Turbina Curtis'a znalazła największe rozpowszechnienie w Ameryce, gdzie wykonywało się ją jako silnik o mocy nawet bardzo wielkiej. Dawniej stosowaną konstrukcję fabryki General Electric Company w Schenectady uwidocznia rys. 21. Jest to turbina ustroju stojącego o pięciu stopniach ciśnienia, z których każdy posiada dwa stopnie prędkości. Para świeża przypływa u góry, a rozprężając się stopniowo w dyszach i wykonywując pracę w wirnikach, płynie równolegle do osi turbiny. Na dole odpływa rurą wylotową do kondensatora. Regulacja odbywa się przez automatyczne zamykanie, względnie otwieranie wentyli, znajdujących się nad dyszami pierwszego stopnia ciśnienia.

Zależnie od obciążenia turbiny, wszystkie dysze są zasilane parą, lub też tylko pewna ich część. W razie przeciążenia turbiny para świeża, również samoczynnie regulowana, dopływa do dysz dodatkowych drugiego stopnia ciśnienia, co wynika także z przedstawionego rysunku.

Generator elektryczny znajduje się nad turbiną. Montaż turbiny o ustroju stojącym jest trudny, a dostęp do poszczególnych części nie jest tak dogodny, jak przy ustroju leżącym. Dodatnią stroną ustroju stojącego jest natomiast przedewszystkiem mniejsze zapotrzebowanie miejsca, korzystniejsze wyrównoważenie mas i mniejsze ścieranie się panwi łożysk.

Obecnie turbiny Curtis'a o ustroju stojącym są rzadko stosowane w Ameryce dla wytwarzania wielkiej mocy, a używa się tego systemu, jednakże o ustroju leżącym, tak samo jak w Europie przeważnie dla mocy małej i średniej jako turbin o jednym, dwóch, a wyjątkowo trzech stopniach ciśnienia z dwoma lub trzema stopniami prędkości.

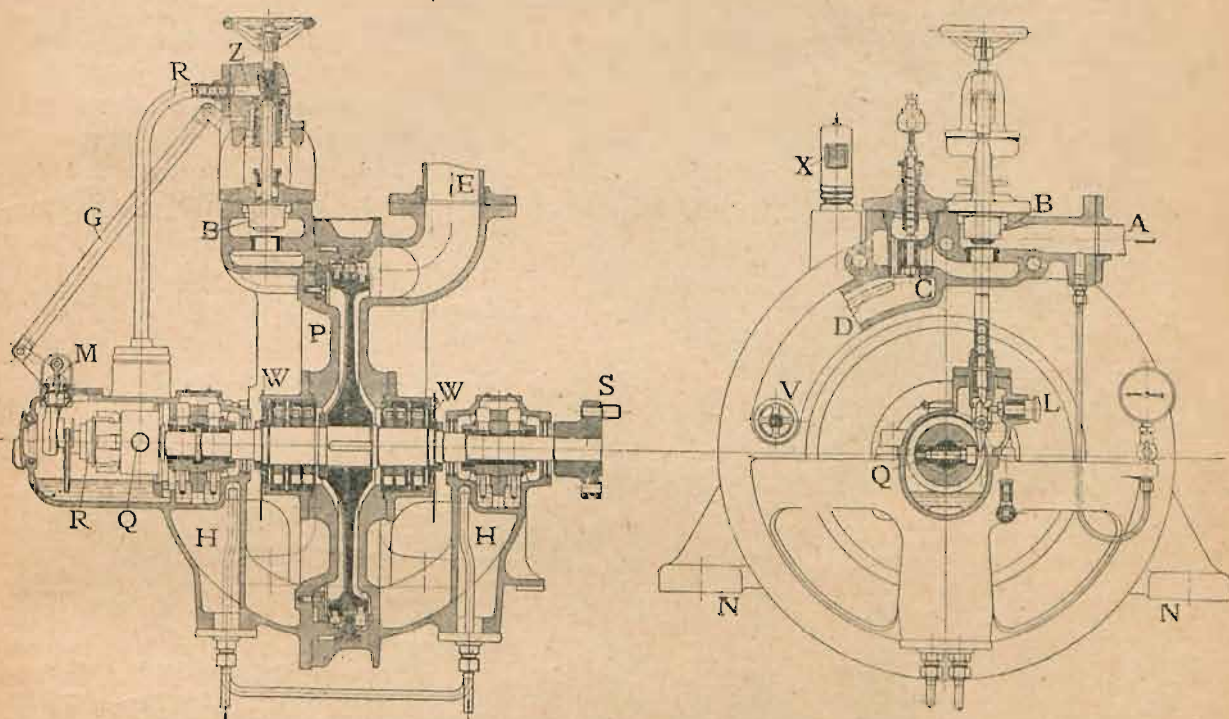
Turbiny Curtis'a o jednym stopniu ciśnienia, pracujące z liczbą obrotów $n = 3000$ do 6000 na minutę, nadają się bardzo do wyzyskania mniejszych spadków



Rys. 21.

ciepłika, np. przy pracy z większą przeciwprężnością pary, której używa się do ogrzewania, lub do różnych celów fabrykacyjnych. Turbina tego rodzaju o mocy aż do 100 kilowatt, budowana przez fabrykę Brown Boveri w Baden w Szwajcarii, jest przedstawiona

w przekroju na rys. 22, a zewnętrzny widok jej na rys. 23. Para świeża dopływa przy *A*, płynie przez wentyl główny *B* i wentyl regulacyjny *C* do dysz *D*, w których rozpręża się na wymaganą przeciwpężność. Potem para wykonywa pracę w wirniku i uchodzi przy *E* na zewnątrz. Wirnik, posiadający dwa wieńce, jest osadzony na wale, spoczywającym w dwóch łożach, zaopatrzonych w smarowanie pierścieniowe; — panwie łożysk są wyłożone białym metalem. Jedno z łożysk (na rys. 22 lewe) jest zbudowane jako łożo stopowe, celem ustalenia osiowego położenia wirnika, gdyż nie potrzebuje ono w akcyjnej tej turbinie przejmować większych nacisków osiowych. Korpus każdego łoża jest połą-



Rys. 22.

czony ramionami z jedną połową osłony turbinowej. Do części osłony po stronie wylotowej jest przyłana noga *N*, spoczywająca na płycie fundamentowej; — w tej części osłony znajduje się także wentyl bezpieczeństwa *X*. Po zdjęciu pokrywy z łożyska po stronie dopływowej i odsunięciu pokrywy *P* zapewniony jest dostęp do wirnika. Poza-tem przytwierdzone są do osłony turbinowej manometr i termometr. Turbiny te o mocy aż do 400 kW posiadają urządzenie, umożliwiające chłodzenie łożysk. W tym celu znajdują się pod łożami komory *H* na wodę, do których doprowadza się ją w miejscach najniższych, a odprowadza w najwyższych. Chłodzenie łożysk jest bardzo pożądane przy wysokiej temperaturze pary świeżej, przy dużej przeciwpężności i przy wysokiej temperaturze w miejscu ustawienia turbiny; — gdzie chłodzenie nie jest konieczne, można go nie włączać. Ponieważ turbiny tego rodzaju muszą także pracować z przeciwpężnością aż do 3 atm. abs., przeto zaopatruje się je w dławnice z pierścieniami stałymi, wykonanymi z mieszaniny węgla z grafitem, które są szczelniejsze od dławnic z uszczelnieniem grzebieniastem i nie wymagają smarowania oliwą. Celem ochrony łożysk przed ciepłem promieniującym z osłony turbinowej i parą, choć w nieznacznej części uchodzącą z dławnic,

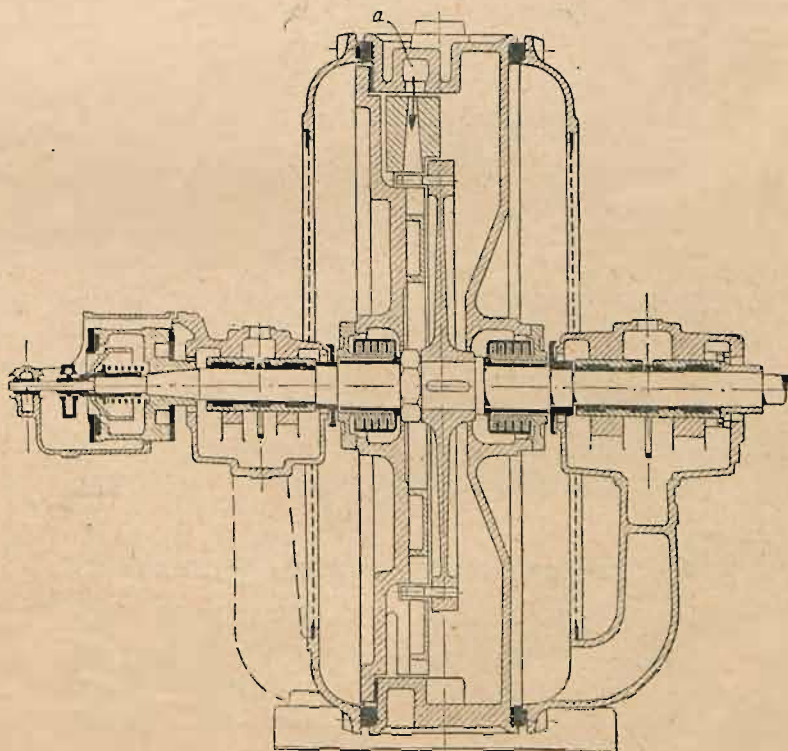
ziomej, górna jej część także w osi pionowej, a korpusy łożysk są przyłane do dolnej części osłony; — odpływ pary odbywa się w kierunku dolnym, — panwie łożysk są smarowane oliwą, stojącą pod ciśnieniem (lewe łoże jest również łożem stopowem), — płyta fundamentowa, na której spoczywa turbina, służy zarazem za zbiornik oliwy, zaopatrzony w urządzenie do jej chłodzenia.

Konstrukcje jednostopniowych turbin Curtis'a, wykonywanych przez inne fabryki, są podobne do powyżej opisanych. Niektóre wytwórnie stosują jednakże większą liczbę stopni prędkości, mianowicie 3 do 4, czyli zaopatrują wirnik w 3 do 4 wieńców łopatkowych.

Turbiny Curtis'a o dwóch lub trzech stopniach ciśnienia w połączeniu z kondensacją są stosunkowo tanie w wykonaniu, lecz spożywają wielką ilość pary. Skutkiem tego polecać je można jako maszyny zapasowe, nawet o większej mocy, lub też w razie odbierania z turbiny pary o ciśnieniu żądanem, np. panującym za pierwszym stopniem turbiny, do celów fabrykacyjnych.

§ 8-b. Turbina Elektra.

Akcyjna turbina „Elektra“, zaprojektowana po raz pierwszy przez inżyniera Kolba, posiada jeden lub dwa stopnie ciśnienia z kilkoma stopniami prędkości. Cechą jej charakterystyczną jest promieniowy przepływ pary przez wieńiec łopatkowy wirnika,

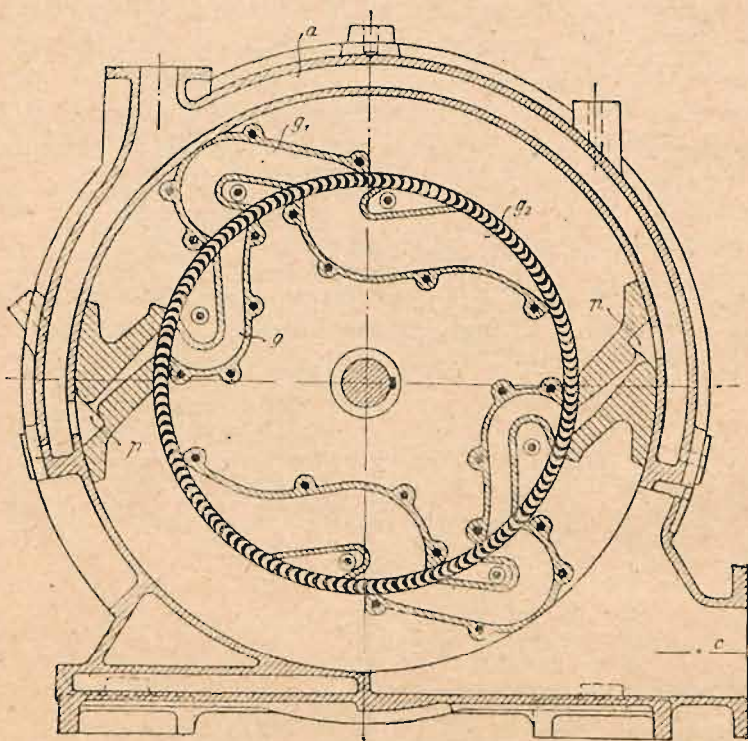


Rys. 25.

a odpowiednia jest przede wszystkim jako silnik o mocy małej i średniej. Aż do około 50 koni wykonywa się ją przeważnie o jednym stopniu ciśnienia z czterema stopniami prędkości, od 50 do 800 koni o dwóch stopniach ciśnienia, z których każdy posiada przeważnie trzy stopnie prędkości. Celem polepszenia współczynnika sprawności turbiny wydawnia się w ostatnim czasie dążność do stosowania mniejszej liczby stopni prędkości.

kości; — np. turbina o mocy 1000 koni mech., pracująca z $n = 3500$ obr/min., posiada trzy stopnie ciśnienia, z których dwa pierwsze mają po dwa stopnie prędkości, trzeci wirnik natomiast tylko jeden stopień prędkości.

Turbinę jednostopniową powyższego rodzaju przedstawiają rys. 25 i 26. Para świeża dopływa kanałem a do dwóch dysz p , w których rozpręża się na prężność wylotową, panującą w miejscu c . Wychodząc z dysz, para płynie przez wieniec wirnikowy, potem przez kierownice g , dalej znowu przez wieniec wirnikowy, kierownice g_1 , wieniec wirnikowy, kierownice g_2 ,



Rys. 26.

a w końcu znowu przez wieniec wirnikowy, potem przez wylot c uchodzi do skraplacza. Zasilanie wieńca wirnikowego jest więc tylko częściowe, a kierownice służą jedynie do zmiany kierunku prądu pary. Z powyższego opisu wynika, że promieniowy przepływ pary umożliwia zastosowanie kilku stopni prędkości przy jednym wieńcu łopatkowym wirnika. W kole Curtis'a natomiast (patrz rys. 22) trzeba wykonywać w analogicznych wypadkach kilka wieńców łopatkowych na obwodzie wirnika. Ze względu na przepływ promieniowy pary

łopatki muszą wystawać z boku wirnika (rys. 25), co tworzy pewną słabą stronę turbiny.

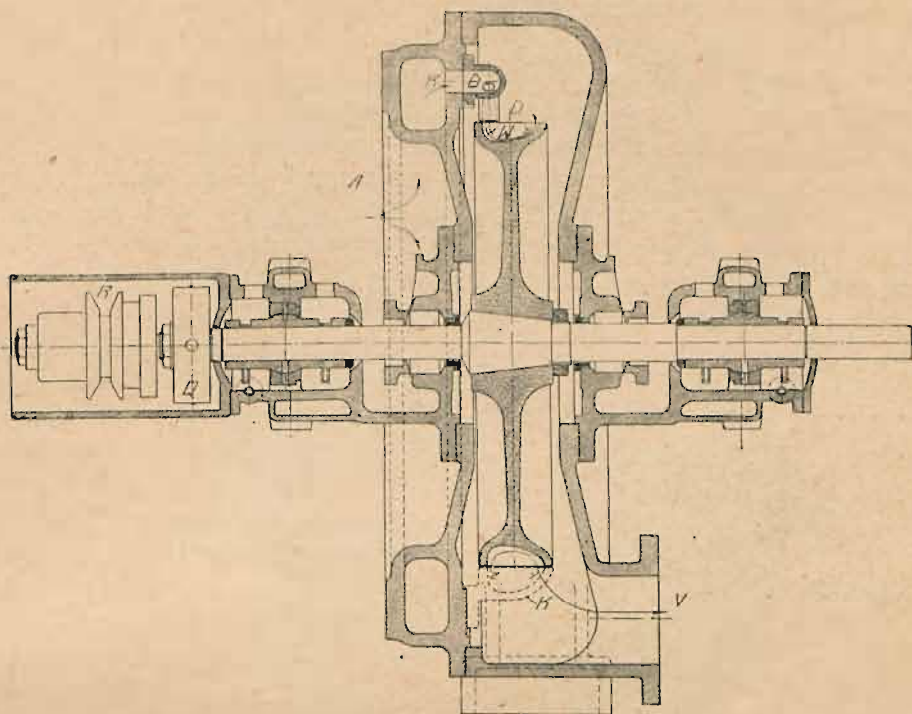
Nadmieniwszy jeszcze można, że w turbinie Elektra stosuje się także czasem mały stopień reakcyjności z przyczyn, o których wspomniano przy rozpatrywaniu turbiny Curtis'a.

§ 8-c. Turbina fabryki Brandel i Witoszyński.

Fabryka Brandel i Witoszyński w Warszawie (Praga) buduje turbiny parowe od najmniejszych typów, a stosuje jednakowy system budowy pomysłu prof. Czesława Witoszyńskiego w turbinach od 1 do 500 KM. (Koni mechanicznych).

Konstrukcja turbiny o mocy 60 KM. jest uwidoczniiona na rys. 27. Para świeża dopływa do osłony turbinowej przy A , płynie z komory B do jednej lub kilku dysz D , w których rozpręża się całkowicie na przeciwpężność wylotową. Z wielką prędkością, uzyskaną przez ekspansję w dyszach, para wchodzi przy X do wieńca łopatkowego wirnika W , przepływa go w kierunku X do Y , przyczem z powodu oddawania pracy traci część swej prędkości bezwzględnej. Przy Y strumień pary przechodzi do wieńca nieruchomej kierownicy K , w której bez dalszej ekspansji zmienia tylko kierunek o 180° , płynąc przez wieniec kierowniczy od Y do Z i tracąc część swej prędkości z powodu strat

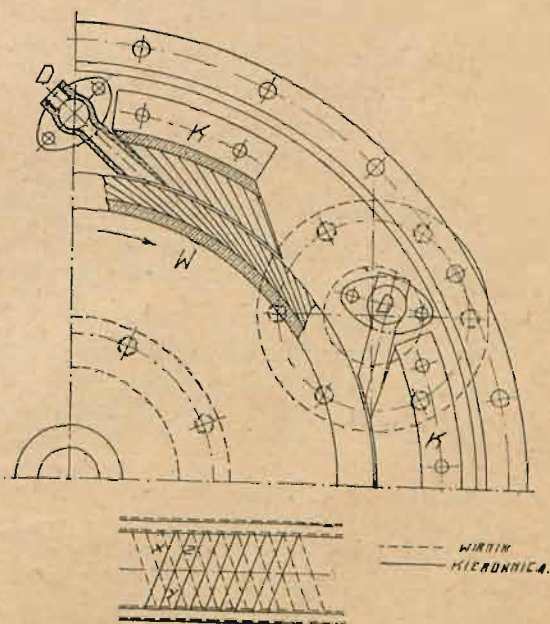
przy przepływie przez tenże wieniec. Teraz para wraca na wieniec wirnika, przy którego drugim przepływie zmniejsza się powtórnie jej szybkość i t. d., aż należycie



Rys. 27.

wyzyskana ostatecznie idzie do wylotu turbiny. Zależnie od warunków, w jakich turbina pracuje, para wychodząca z dyszy przepływa 4 do 5 razy przez wieniec wirnikowy (4 lub 5 stopni prędkości), czyli 3 do 4 razy przez wieniec kierownicy *K*. Liczba dysz jest ta sama co i kierownic, a wynosi przy ciśnieniu admissyjnym 8 atmosfer nadciśnienia w turbinie 2,5-konnej 1, a w turbinie 60-konnej 6 dysz.

Budowa turbin parowych omawianego typu jest prosta i mocna. Łopatki wirnika i kierownicy mają kształt płaski i umocowane są w sposób zapobiegający ich wyłamaniu wewnątrz kanału, wytoczonego na obwodzie zewnętrznym wirnika względnie wewnętrznym kierownicy. Wirniki, kierownicy i dysze wykonane są z brązu, a łopatki z blachy mosiężnej. Jakkolwiek koło wirnikowe jest całkowicie obrobione i możliwie dokładnie wyrównowane, to

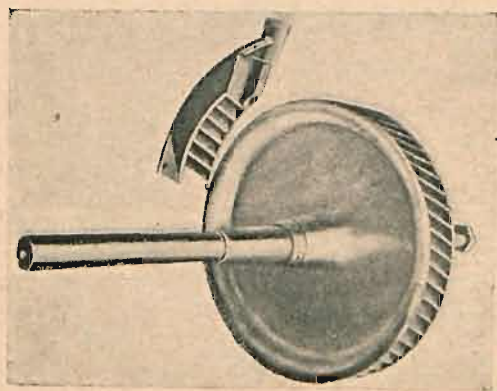


Rys. 28.

jednak wobec dość znacznej, w stosunku do jego wagi, liczby obrotów, wałek musi posiadać wymiary dostateczne, aby uniknąć drgań, spowodowanych minimalnem przesunięciem

środku ciężkości. Z tego również względu, wałek jest osadzony nie w jednym, — jak to często praktykuje się w mniejszych turbinach —, lecz w dwóch łożyskach z pierścieniowym smarowaniem, zaopatrzonych w długie brązowe panewki wahliwe, nastawiające się samoczynnie wzdłuż wałka.

Regulacja liczby obrotów odbywa się, podobnie jak w innych typach małej mocy, przez dławienie pary wlotowej zapomocą wentyla, połączonego drążkami bezpośrednio z regulatorem *R*, umieszczonym na końcu wałka w osobnej osłonie. Niezależnie od regulatora dopływ pary może być miarkowany przez przymykanie ręczne poszczególnych dysz, zwłaszcza, jeżeli turbina ma dłuższy czas pracować przy mniejszem niż normalne obciążeniu. Wreszcie na wypadek raptownego spadku obciążenia, turbina posiada jeszcze regulator bezpieczeństwa *Q*, który przy przekroczeniu liczby obrotów o 10% ponad normalną odcina natychmiast całkowicie dopływ świeżej pary do dysz.



Rys. 29.

Turbina parowa fabryki Brandel i Witoszyński jest, jak wynika z powyższego opisu, jednostopniową akcyjną turbiną promieniową z kilkoma stopniami prędkości. Kilkakrotny przebieg pary przez wieniec wirnikowy, połączony ze stopniem zmniejszaniem szybkości pary, pozwala na stosowanie umiarkowanej prędkości obwodowej i umiarkowanej liczby obrotów przy uniknięciu przekładni zębatych.

Rozkład dysz *D* i kierownic *K* nad wirnikiem *W* jest przedstawiony na rys. 28. Zewnętrzny widok wirnika wraz z wałem, kierownicy i dyszy turbiny 2,5 konnej przed-

stawia rys. 29, na podstawie którego łatwo można sobie przedstawić przepływ pary. Turbiny te pracują z liczbą obrotów od 1800 do 4000 obr/min.

§ 9. Osiowe turbiny kombinowane.

W celu usunięcia wad, a wyzyskania zalet poszczególnych systemów przedtem rozważanych, powstały różne kombinacje turbin. Dla wytworzenia wielkiej mocy obecnie może najwięcej są rozpowszechnione kombinowane turbiny osiowe i to przedewszystkiem w następujących połączeniach:

- 1) koło Curtis'a z wielostopniową turbiną akcyjną,
- 2) koło Curtis'a z wielostopniową turbiną reakcyjną,
- 3) kilkostopniowa turbina akcyjna z wielostopniową reakcyjną.

§ 9-a. Koło Curtis'a w połączeniu z wielostopniową turbiną akcyjną.

Typ powyższy powstał w fabryce turbin parowych towarzystwa „A. E. G.” w Berlinie. Obecnie budują go także fabryki, które dawniej wykonywały wyłącznie turbiny systemu Rateau'a lub Zoelly'ego, np. Škoda w Pilźnie, Bergmann w Berlinie, „M. A. N.” w Norymberdze. Konstrukcję ostatniej fabryki uwidocznia rys. 30.

Para świeża zamienia w dyszach *S* większą część swej prężności na prędkość, rozprężając się na 3 do 2,5 atm. abs. Zasilanie koła Curtis'a *C*, posiadającego wieniec kierowniczy *U*, odbywa się na części obrotu. Po oddaniu pracy w kole Curtis'a para ply-