

ciśnienie p_2 , które jest większe od ciśnienia p_3 . Z tej przyczyny należy, w celu uniknięcia wielkich strat pary, zasilać wieniec łopatkowy wirnika na całym obwodzie.

Cechą charakterystyczną turbin częściowo reakcyjnych jest zamiana energii ciśnienia pary na energię kinetyczną częściowo w łopatkach kierownicy i częściowo przy przepływie przez wieniec wirnika. Para wykonywa skutkiem tego w kole turbinowym pracę mechaniczną częściowo przez akcję t. j. nacisk, powstały przez zmianę kierunku szybkiego prądu pary w łopatkach wirnika, częściowo przez reakcję, powstałą przy wylocie pary z łopatek, z powodu dalszej ekspansji w kanałach pomiędzy łopatkami wirnika. Zwykle nazywamy turbiny częściowo reakcyjne „turbunami reakcyjnymi”, ponieważ budowa turbin całkowicie reakcyjnych jest z przyczyn przedtem podanych niemożliwa.

Turbin częściowo reakcyjnych nie buduje się jednostopniowych, ponieważ wtedy należałoby stosować bardzo wielkie prędkości obwodowe wirnika; np. w turbinach półreakcyjnych około $1,4 \times$ prędkość obwodową jednostopniowej turbiny akcyjnej.

Oprócz tego zasilanie wirnika na całym obwodzie wymagałoby w jednostopniowej turbinie częściowo reakcyjnej stosowania łopatek nadzwyczaj niskich, których wykonanie byłoby wprost niemożliwe.

III. Najważniejsze rodzaje turbin parowych

§ 5. Turbina de Laval'a.

Całość turbiny de Laval'a przedstawiają rys. 5 i 6. Para świeża przychodzi z kotła rurą A i dostaje się przez wentyl regulacyjny D do przestrzeni E . W ścianie, znajdującej się pomiędzy przestrzenią E a łopatkami wirnika C , umocowane są dysze w ilości dwóch do czterech, zależnie od wielkości turbiny. Położenie ich względem wirnika C uwidocznia rys. 1. W dyszach para rozpręża się na przeciwprężność wylotową, z którą, po oddaniu pracy w łopatkach wirującego koła turbiny, uchodzi przez przestrzeń R otworem N z osłony turbiny. Z powodu promieniowego układu łopatek względem wirnika, para przepływa przez wieniec łopatkowy równolegle do osi turbiny.

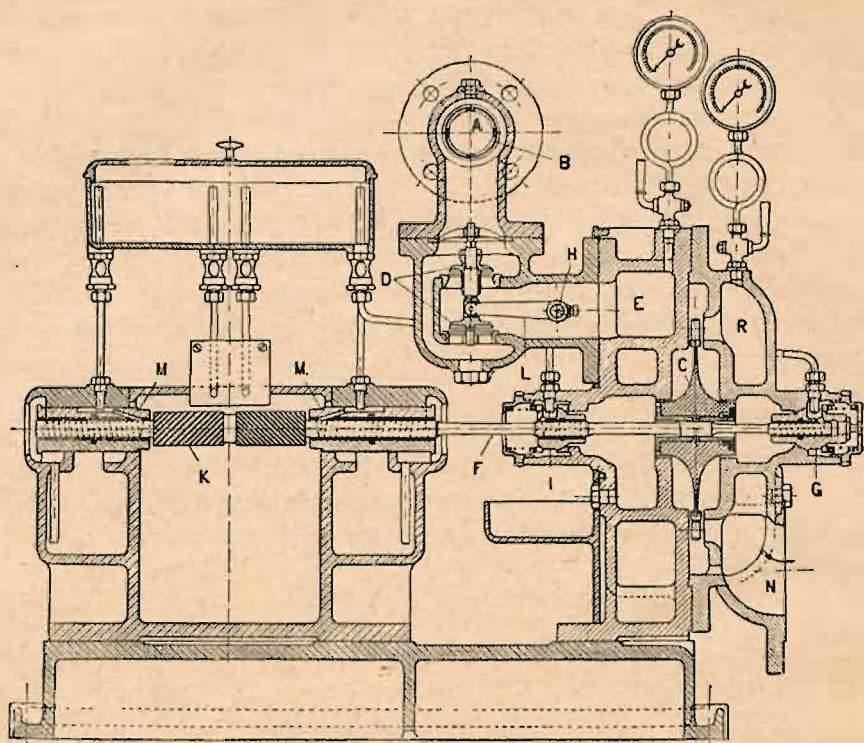
Na podstawie opisu powyższego można turbinę de Laval'a określić jako jednostopniową osiową turbinę akcyjną z zasilaniem na części obwodu wirnika.

Osiągnięcie możliwie korzystnego wyniku wymaga w turbinie powyższego rodzaju zastosowania bardzo wielkiej prędkości obwodowej u wirnika (patrz wzór 6). Uzyskać ją można przez zastosowanie dużej średnicy D koła i mniejszej liczby obrotów n wału turbinowego, lub też wielkiej liczby obrotów n i mniejszej średnicy D , gdyż prędkość

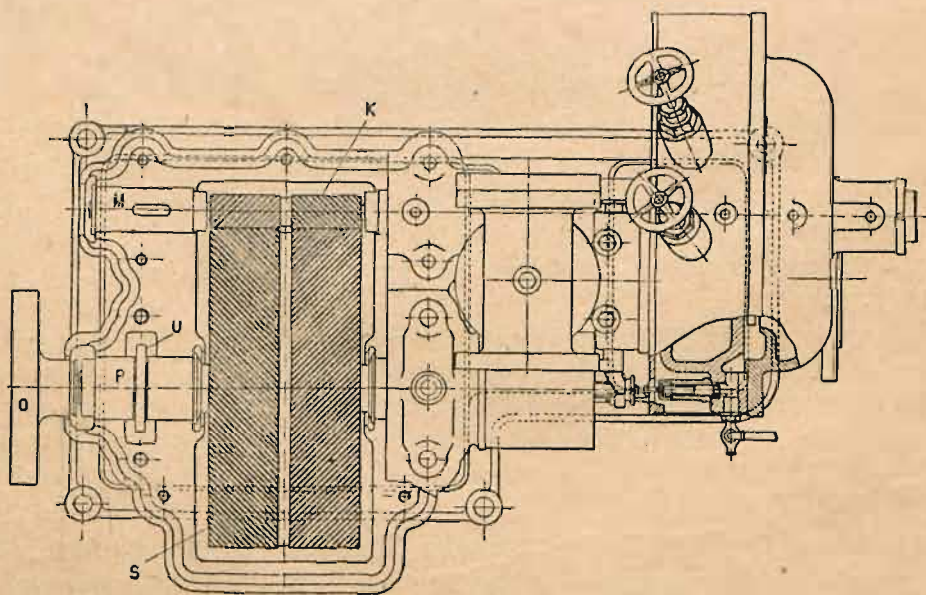
$$\text{obwodowa } u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \text{ m/sek.}$$

De Laval stosuje wielką liczbę obrotów, $n = 10000$ do 30000 na minutę, natomiast średnicę wirnika możliwie małą, w każdym razie poniżej 800 mm . Jako najwyższej dopuszczalną prędkość obwodową koła oznaczyćby można $u \leq 400 \text{ m/sek}$. Trudności powstające przy budowie turbiny, biegnącej z tak ogromną liczbą obrotów, opanował de Laval z odwagą godną podziwu.

Bezpośrednie pędzenie maszyn wałem, biegnącym z wyżej wspomnianą ogromną liczbą obrotów, jest niemożliwe, wobec czego wynalazca zastosował przekładnię (rys. 5 i 6) z pomocą kół śrubowato zazębionych K i S , których wykonanie



Rys. 5.



Rys. 6.

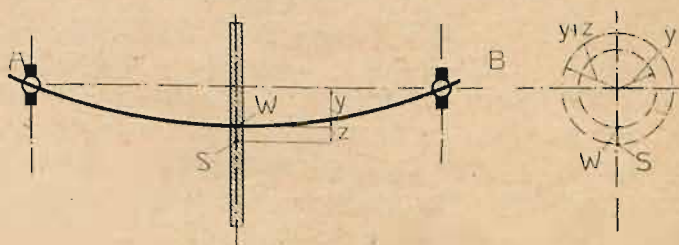
jest bardzo trudne i wymaga wielkiej dokładności. Przyłączenie wału maszyny pędzonej następuje przy sprzęgle O.

Znacznie trudniejsze było uzyskanie biegu turbiny bez wstrząśnięć przy tak wielkiej liczbie obrotów. To dynamiczne zagadnienie rozwiązał de Laval w sposób genialny

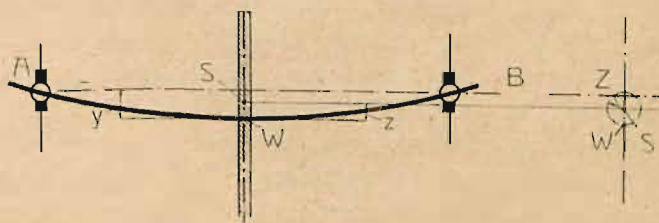
przez użycie wału gibkiego. Całkowite wyrównoważenie koła jest praktycznie niemożliwe, ponieważ położenie punktu ciężkości zmienia się podczas ruchu silnika pod wpływem sił odśrodkowych i działania ciepła. Najmniejsze przesunięcie punktu ciężkości względem środka wału wywołuje ogromne siły odśrodkowe, np. przesunięcie o $\frac{1}{10}$ mm wywołuje siłę odśrodkową większą niż 60-krotny ciężar koła. Wydawałoby się, że w podobnych warunkach należałoby wykonać wał możliwie silny. Wynalazca wybrał natomiast wał bardzo cienki, aby mógł się uginać. Średnica wału jest tylko taka, jak tego wymaga moment obrotowy.

Zachowanie się wału gibkiego, obciążonego kołem, można wytłumaczyć na podstawie rys. 7 i 8. Jeśli nie uwzględnimy przegięcia wału pod wpływem ciężaru koła i ciężaru własnego i jeśli

przyjmujemy, że środek ciężkości S oddalony jest, z powodu niedostatecznej dokładności wykonania, od środka wału W o odległość z , to wał przegnie się przy pewnej liczbie obrotów pod wpływem działania sił odśrodkowych niezupełnie wyrównoważonego koła o wielkość y . Środek wału W będzie podczas ruchu opisywał wokół osi $A-B$ koło o promieniu y , a środek ciężkości S również koło o promieniu $y+z$ (rys. 7). Przy zwiększającej się liczbie obrotów zwiększa się także prze-



Rys. 7.



Rys. 8.

gięcie y . Wynika z tego, że przy pewnej wielkiej liczbie obrotów t. zw. krytycznej, musiałoby nastąpić pęknięcie wału. Jeśli jednakże uniemożliwi się nadmierne przegięcie się wału, np. według rys. 5 zapomocą występów osłony turbinowej, znajdujących się nad piastą wirnika C , to przy szybkim przejściu na większą liczbę obrotów niż liczba krytyczna, otrzymuje się bardzo charakterystyczne zjawisko, które teoria jak i praktyka potwierdzają. Mianowicie wał gibki, przechodząc przez linię prostą, przegina się w kierunku przeciwnym, tak, że punkt ciężkości S znajduje się teraz bliżej osi $A-B$ według rys. 8. Środek wału W opisuje koło o promieniu z wokół środka ciężkości S .

W warunkach praktycznych dana jest nam zwykle liczba obrotów wału, czyli jego prędkość kątowna ω . Wielkość krytycznej prędkości kątowej ω_k , przy której następowałoby pęknięcie w razie braku stosownego ograniczenia przegięcia się wału, można ustanowić wedle życzenia przez wybór odpowiedni odległości łożysk. Jeśli odległość ta jest duża, otrzymuje się stosunkowo małą krytyczną prędkość kątową ω_k , np. w turbinach de Laval'a $\omega = 5$ do $8 \omega_k$.

Jedynie dzięki temu trafnemu wyborowi de Laval uzyskał dobry bieg turbiny bez wstrząśnięć, te bowiem zachodzą przede wszystkim przy przechodzeniu przez krytyczną liczbę obrotów, ponieważ wał i koło opuszczają wtedy wspólną oś obrotu; — przy większej liczbie obrotów, niż krytyczna, następuje znowu bieg spokojny. Z tej przy-

czynny należy przechodzić z mniejszej liczby obrotów na większą niż krytyczna możliwie szybko.

Oczywiście wyrównoważenie wirnika trzeba przeprowadzić możliwie jak najstaranniej, aby z było możliwie najmniejsze.

Regulacja odbywa się przez dławienie pary świeżej zapomocą wentyla D , na który działa regulator odśrodkowy (rys. 5). Oprócz tego można ręcznie zamykać poszczególne dysze, jak to wynika z rys. 6.

Zalety turbiny de Laval'a streścić można w następujących słowach. Do osłony turbiny dopływa para całkowicie rozprężona, więc posiadająca niskie ciśnienie i niską temperaturę. Jest to bezwarunkowo korzystne ze względu na wydłużanie się wirnika i osłony pod wpływem ciepła pary. Ponieważ ciśnienie po obydwóch stronach wieńca łopatkowego jest jednakowe, strumień pary, wychodzący z dyszy, nie ma tendencji rozszerzania się, lecz przepływa, pomimo szczeliny pomiędzy dyszą a łopatkami, bezpośrednio w wieńiec łopatkowy. Z powodu oporów w kanałkach pomiędzy łopatkami, ciśnienie pary jest w rzeczywistości po stronie dolotowej łopatek trochę większe niż po stronie wylotowej. Oprócz tego w praktyce łatwo zająć mogą wypadki, w których stosunek ciśnienia dolotowego do wylotowego nie odpowiada stosunkowi, dla którego obliczono i wykonano wolne przekroje dysz. Wtedy strumień pary rozszerza się częściowo w szczelinie, powodując straty.

Mimo najwyższego uznania dla genialnego wynalazcy, należy jednak wspomnieć o wadach jego turbiny. Najdotkliwsze z nich są może ogromna liczba obrotów wału i konieczność zmniejszenia jej w jakikolwiek sposób. Obiedwie powstają skutkiem jednostopniowego rozprężania pary. Z tej samej przyczyny para posiada bardzo wielką prędkość, która powoduje znaczne zdzieranie łopatek. Z powodu częściowego zasilania wirnika, straty, powstałe przez wentylację, są dosyć znaczne.

Ponieważ oprócz tego współczynnik sprawności turbiny jednostopniowej jest niekorzystny, czyli spostrzebowanie pary bardzo duże, turbiny de Laval'a nie znalazły większego rozpowszechnienia, zwłaszcza, że z powodu konieczności stosowania kół zębatych, pracujących z bardzo wielką liczbą obrotów, mogły być jedynie wykonywane typy o mocy mniejszej, przeważnie do 300 koni, ponieważ dawniej nie potrafiono budować podobnych przekładni dla mocy większej.

§ 6. Turbina Parsons'a.

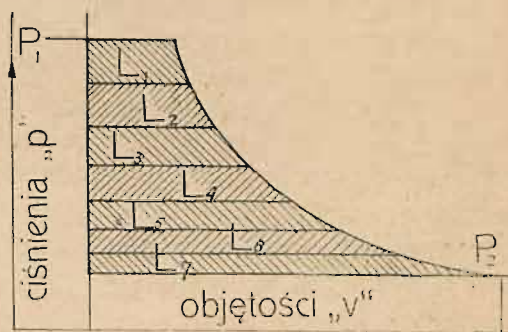
Na zasadniczo innych podstawach niż de Laval, zbudował swą turbinę, zdolną do wytwarzania wielkiej mocy, inżynier Parsons. W celu opanowania głównej trudności, jaka zachodzi przy budowie turbin parowych, mianowicie w celu uzyskania niezbyt wielkiej prędkości obwodowej wirnika oraz stosunkowo niewielkiej liczby obrotów wału turbinowego, Parsons podzielił całkowity spadek ciśnienia z prężności admisyjnej p_1 na ciśnienie wylotowe p_2 na kilkadziesiąt stopni; — uzyskał przez to stosunkowo małą liczbę obrotów, przy której generator elektryczny mógł być bezpośrednio połączony z wałem turbinowym.

Zamiast dysz użył wynalazca kierownic, zaopatrzonych w wieńiec łopatkowy.

Rozprężanie pary odbywa się stopniowo w wieńcach kierownic i w wieńcach wirników, skutkiem czego turbina jest częściowo reakcyjną. Na rys. 9, w którym uwidoczniono tylko kilka stopni ciśnienia, L_1 przedstawia powierzchnię

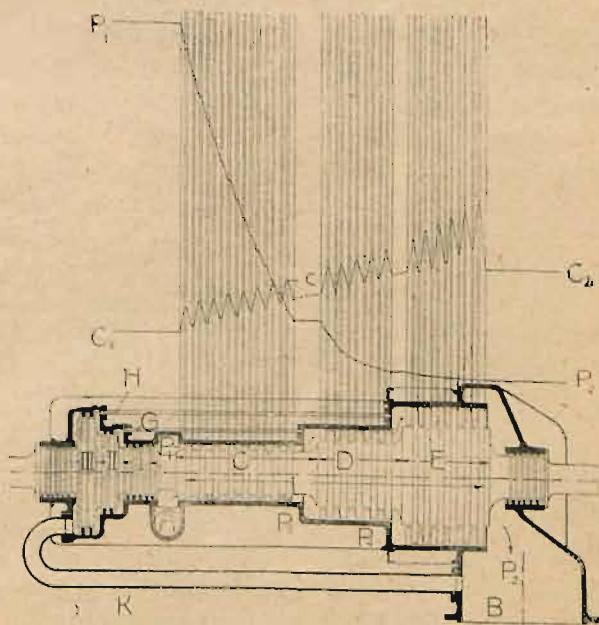
pracy, która zamieniona zostaje w pierwszej kierownicy na energję kinetyczną, a L_2 pracę, którą para wykonywa w pierwszym wirniku z powodu działania reakcji; — L_3 odnosi się do drugiej kierownicy, L_4 do drugiego wirnika i t. d.

Każda kierownica wraz z wirnikiem tworzy osobną turbinę, którą tutaj nazywamy „stopniem“. Poszczególne turbiny umieścił Parsons tuż obok siebie, tak że para płynie bezpośrednio z łopatek pierwszej kierownicy do łopatek wirnika, a z tych do następnej kierownicy i t. d., rozprężając się tak w kierownicach jak i w wirnikach. Prędkość wylotowa pary z wirnika zostaje więc wyzyskana w następnej kierownicy, tworząc jej prędkość wlotową.



Rys. 9.

Przebieg rozprężenia pary z ciśnienia p_1 na ciśnienie p_2 , oraz panujące prędkości bezwzględne pary c uwidocznią schematycznie rys. 10. Para świeża wchodzi do turbiny przez wlot A , płynie równolegle do osi wału przez wielką liczbę stopni turbiny, wciąż rozprężając się, a uchodzi całkowicie rozprężona przez wylot B osłony turbinowej. Zasilanie wirników odbywa się, ze względu na pewien stopień reakcyjności, na całym obwodzie wieńców łopatek. Turbina składa się więc z większej liczby wirników, pomiędzy którymi umieszczone są koła kierownicze. W celu uzyskania możliwie krótkiej budowy turbiny, Parsons umocował łopatki wirników na bębnie o długości L ; — łopatki kierownicze są przytwierdzone do osłony. Komórki, przez które przepływa para pomiędzy łopatkami, powstają przez umieszczenie wkładki pomiędzy każdymi dwiema łopatkami. Ponieważ objętość pary zwiększa się z powodu ekspansji, długość łopatek musi stopniowo wzrastać. Aby przy końcu turbiny nie otrzymać za długich, a na początku za krótkich łopatek, bęben posiada trzy różne średnice na długościach C , D , E .



Rys. 10.

Z powyższego opisu wynika, że turbinę Parsons'a można określić jako wielostopniową, osiową, turbinę reakcyjną (ściślej, częściowo reakcyjną). Najczęściej wykonywa się turbiny półreakcyjne, t. j. w kierownicy wyzyskuje się równie wielki spadek ciśnienia jak w przynależnym wirniku. Ponieważ ciśnienie pary po stronie dolotowej łopatek wirników jest większe niż po stronie wylotowej, przeto odległość pomiędzy wieńcami wirników a osłoną turbinową winna być możliwie mała, aby uniknąć znacznych strat pary. Z tej samej przyczyny winna być odległość

między wewnętrzną średnicą wieńców kierowniczych a zewnętrznym obwodem bębna możliwie mała. Wspomniane szczeliny powinny być, zwłaszcza w części wysokoprężnej, możliwie małe ($\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{4}$ mm), ponieważ ciśnienie pary spada tutaj prędzej, niż w części niskoprężnej (patrz rys. 10) i ponieważ z powodu krótkości łopatek nawet mała szczelina tworzy stosunkowo wielki procent wysokości łopatek. W części niskoprężnej można wykonywać większe szczeliny, aż do 1 mm, bez powodowania znaczniejszych strat pary. W rzeczywistości jednakże stosowanie w części wysokoprężnej tak małych szczelin, jak powyżej podano, jest niemożliwe, zwłaszcza przy pracy z parą przegrzaną. Pod działaniem tej ostatniej łopatki wydłużają się znacznie, a w razie braku dostatecznie dużej szczeliny mogłyby się zatrzeć o osłonę, względnie o bęben.

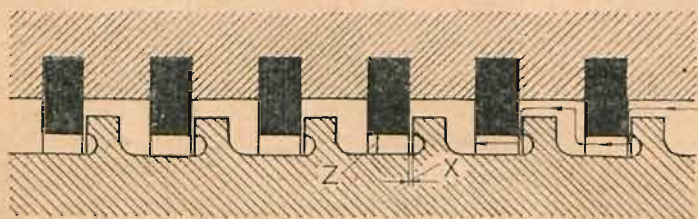
Z powodu pewnego stopnia reakcyjności, czyli z powodu ekspansji pary w wieńcach wirnikowych, powstaje także pewien nacisk, który stara się przesunąć bęben w kierunku prądu pary.

W celu zrównoważenia tego nacisku, Parsons zastosował t. zw. tłoki odciążające, oznaczone na rys. 10 liczbami I, II i III, które tworzą jedną z najłagodniejszych stron jego turbiny.

Na poszczególne strony tych tłoków działa różne ciśnienie pary, którą doprowadza się rurami G , H , K .

Na tłok I działa z jednej strony prężność p_1 , a z drugiej mniejsza prężność p_3 , na tłok II działa z jednej strony prężność p_3 , a z drugiej mniejsza prężność p_4 , na tłok III działa z jednej strony prężność p_4 , a z drugiej mniejsza prężność p_2 .

W powyższy sposób można z łatwością zrównoważyć wspomniany nacisk, działający w kierunku prądu pary. Trudności sprawia jedynie uszczelnienie tłoków, którego dokonał Parsons zapomocą t. zw. szczeliny grzebieniastej, usuwając przez to wszelkie straty, powstające przez tarcie. Zasadę tego uszczelnienia można wytłumaczyć na podstawie rys. 11. W tłokach, wirujących razem z bębnem turbinowym, są wytoczone wpustki, w które wchodzi pierścienie, osadzone w osłonie turbiny. Szczeliny w kierunku



Rys. 11.

osiowym X muszą być możliwie małe (0,2 do 0,3 mm), aby jak najmniej pary mogło się przez nie przedostać; – szczeliny w kierunku promieniowym Z są większe. Kierunek prądu pary jest wskazany na rysunku. Para, która przepływa przez pierwszą szczelinę osiową, traci swą prędkość przez wiry

w dużej szczelinie promieniowej. Aby mogła przedostać się przez następną szczelinę osiową X , potrzebny jest pewien spadek jej prężności, tak, że w drugiej szczelinie Z panuje ciśnienie mniejsze niż w pierwszej.

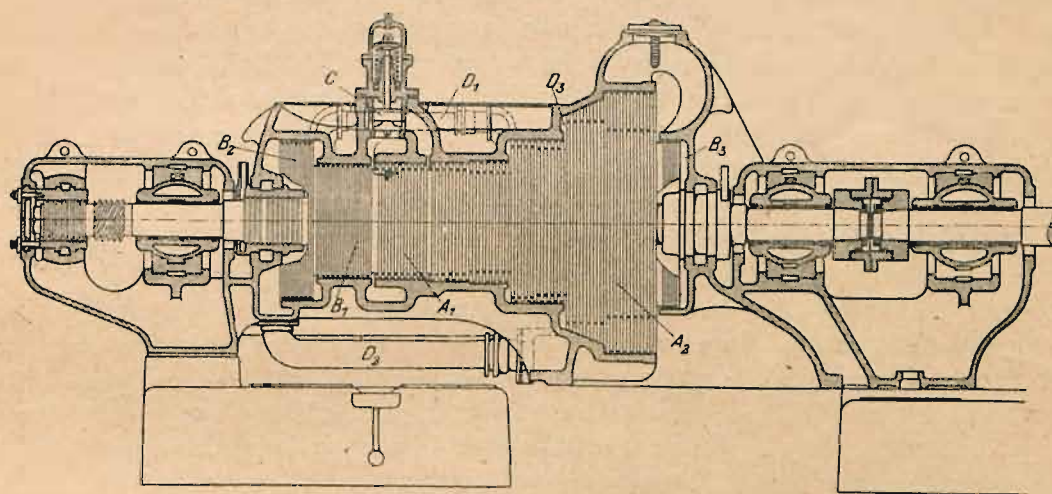
Chcąc uzyskać choć względną szczelność tłoków, należy oczywiście zastosować kilka, lub kilkanaście powyższych grzebieni.

Parę, która przepłynęła przez uszczelnienie grzebieniaste, częściowo odzyskujemy dzięki połączeniu zapomocą rur G i H z dalszymi stopniami turbiny. Zamiast małych odległości osiowych, a większych promieniowych, można oczywiście stosować także układ odwrotny, mianowicie małe szczeliny promieniowe, a większe osiowe.

Również w dławnicach użył Parsons uszczelnienia grzebieniaste, które umożliwia uszczelnienie wału, biegnącego z bardzo wielką liczbą obrotów, bez strat na tarcie i bez zużywania się szczeliwa.

Równocześnie uszczelnienie powyższe posiada i tę dodatnią stronę, że para, uchodząca z turbiny, nie zawiera żadnych domieszek oliwy i może skutkiem tego, w razie użycia kondensacji powierzchniowej, służyć bezpośrednio do zasilania kotłów.

Konstrukcyjne wykonanie turbiny Parsons'a przez fabrykę Brown Boveri'ego przedstawia rys. 12. Wał spoczywa na łożyskach, stanowiących całość z dolną częścią dwudzielnej osłony turbinowej. Łopatki kierownic są przytwierdzone do osłony, łopatki wirników są osadzone na bębnie, wewnątrz próżnym, posiadającym trzy różne średnice. Para świeża wchodzi przy F i płynie równoległe do osi wału, w kierunku strzałki najpierw przez część bębna A_1 . Stopniowe zwiększanie się długości łopatek uwidocznia



Rys. 12.

jasno rysunek; — najdłuższe łopatki znajdują się oczywiście w części niskoprężnej A_2 . Tłoki odciążające oznaczono tutaj literami B_1 , B_2 i B_3 ; — działanie trzeciego tłoka tworzy się bowiem przez połączenie przestrzeni B_3 z przestrzenią D_3 , w której panuje ciśnienie większe niż wylotowe (metoda Fullagar'a).

Regulacja samoczynna odbywa się przez dławienie pary dolotowej, a przy przeciążeniu turbiny samoczynny wentyl C wpuszcza parę świeżą wprost do jednej z dalszych kierownic. Śruby przy końcowym łożysku grzebieniastem, znajdującym się po lewej stronie turbiny, służą do regulowania małej szczeliny osiowej przy uszczelnieniu tłoków odciążających. Aby położenie wielkiej rury wylotowej, prowadzącej do ułożonego bezpośrednio pod turbiną kondensatora, nie zmieniało się, podstawa łożyska po stronie niskoprężnej jest silnie przytwierdzona do ramy fundamentowej. Na końcu wału, po stronie niskoprężnej, znajduje się sprzęgło, łączące wał turbinowy z wałem generatora elektrycznego. Podstawa łożyska, znajdującego się w pobliżu tłoka B_2 , może się przesuwac w kierunku osiowym, umożliwiając w ten sposób swobodne wydłużanie się osiowe osłony turbinowej. Również promieniowe wydłużanie się tej ostatniej jest w konstrukcji, przedstawionej na rysunku, stosunkowo korzystne, ponieważ osłona nie posiada żadnej nogi.

Należałoby teraz dać jeszcze pewien pogląd na zalety i wady turbiny Parsons'a.

Główną zaletą są małe prędkości pary, które uzyskuje się dzięki wielkiej liczbie stopni ciśnienia. Skutkiem tego łopatki są mało obciążone, a ich zdzieranie jest nieznaczne. Wprawdzie w części niskoprężnej wzrastają prędkości pary (patrz rys. 10), lecz mimo to część ta pracuje dobrze. Ciężar właściwy pary jest tutaj bowiem mały, a łopatki są wysokie, skutkiem czego brak uszczelnienia pomiędzy poszczególnymi stopniami nie powoduje znaczniejszych strat pary, nawet przy wykonaniu większej szczeliny pomiędzy łopatkami a osłoną, względnie bębniem (około 1 mm). Z powodu zasilania wirników na całym obwodzie straty przez wentylację są stosunkowo małe.

Wady reakcyjnej turbiny Parsons'a streścić można natomiast w słowach następujących. Skutkiem wielkiej długości osłony łatwo mogą zajść odkształcenia jej, zwłaszcza, że wchodzi do niej para o wysokim ciśnieniu i wysokiej temperaturze. Odkształcenie osłony oraz nierówne wydłużanie się długiego bębna i osłony pod działaniem wysokich temperatur pary wpływają bardzo ujemnie na niezawodność biegu turbiny i przyczyniły się nieraz do wyłamania kilkunastu tysięcy łopatek, powodując dłuższe unieruchomienie silnika. Podobne wypadki zajść mogą tutaj bardzo łatwo z powodu małych szczelin pomiędzy wieńcami łopatkowymi a osłoną, względnie bębniem. Najczulszą pod tym względem jest część wysokoprężna, jak już zaznaczono w opisie turbiny. Pomimo wspomnianych małych szczelin, zachodzą pewne straty pary wobec braku wszelkiego uszczelnienia pomiędzy poszczególnymi stopniami ciśnienia. Straty są również największe w części wysokoprężnej, ponieważ prężność pary spada tutaj szybciej, niż w części niskoprężnej i ponieważ szczelina nawet bardzo mała tworzy stosunkowo wielki procent wysokości łopatek. Bardzo niskie łopatki części wysokoprężnej wpływają jednakże na współczynnik sprawności ujemnie nie tyle z powodu wyżej wspomnianych strat przez nieszczelności, jak głównie z powodu niekorzystnego wpływu ścianek i końców łopatek na krańcowe partje wąskiego pierścieniowego strumienia pary. Konstrukcje powyżej opisane są bardzo wrażliwe na wysokie temperatury, lub szybkie zmiany temperatur, z tego więc powodu przed każdym uruchomieniem turbiny należy ją przez kilka godzin (2 do 3) ogrzewać, aby osiągnąć równe wydłużenie się poszczególnych części.

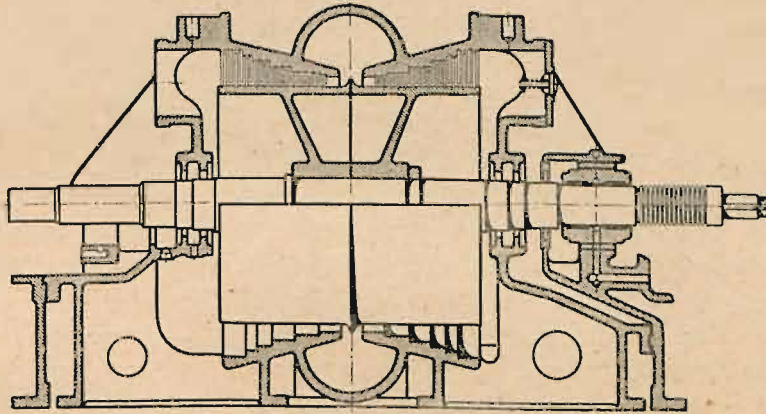
Dalszemi częściami, które w czasie wykonywania pracy przez silnik łatwo mogą być uszkodzone, są łuki odciążające. Z powodu małych szczelin uszczelnień grzebiastych, znajdujących się na dużych średnicach, obawiać się można zatarcia się poszczególnych grzebieni, które w skutkach prowadzi do odkształcenia, lub nawet wyłamania ich.

Zaznaczone powyżej wady turbiny Parsons'a były nieraz przyczyną większych napraw i dłuższego postoju silnika. Wielkie koszty wykonania turbiny, spowodowane ogromną liczbą łopatek i wielką długością turbiny, oraz pewien brak niezawodności biegu przyczyniły się do zastąpienia turbiny Parsons'a na kontynencie europejskim przez inne systemy, nie posiadające wymienionych słabych jej stron.

Wady turbiny Parsons'a nie dają się tak dalece we znaki, jeśli łopatki posiadają w części wysokoprężnej dosyć dużą długość, czyli jeśli turbina musi przerobić dużą ilość pary, więc np. jeśli pracuje z przeciwpężnością, lub jeśli jest zasilana wyłącznie parą wylotową. W takich wypadkach niektóre fabryki europejskie stosują, celem uzyskania dobrego współczynnika sprawności turbiny i małego zdzierania łopatek, także jeszcze obecnie turbinę Parsons'a podług rys. 12 lub też rys. 13. Do turbiny, przedstawionej na rys. 13, dopływa para w środku osłony i przepływa wieńce łopatkowe w kierunkach przeciwnych, skutkiem czego znosi się nacisk, powstający z powodu reakcyjności, a łuki odciążające są zbyteczne. Słabą stroną podobnej budowy jest natomiast trudność zapew-

nienia swobodnego wydłużania się osłony turbiny ze względu na podwójny wylot pary;— celem umożliwienia swobodnego wydłużania należy rury wylotowe elastycznie połączyć z kondensatorem.

Wielkie ilości pary przepływają także przez turbiny o bardzo wielkiej mocy, które posiadają więc w części wysokoprężnej dostatecznie długie łopatki. Kierując się względami powyżej zaznaczonymi, niektóre fabryki amerykańskie używają obecnie wyłącznie turbiny Parsons'a jako silnika o mocy powyżej 20 000 kW (Kilowatt). Nie małe trudności zachodzą tutaj jednakże z powodu wielkiej długości turbiny i konieczności opanowania bardzo wielkiej objętości pary przez część niskoprężną. W celu pokonania



Rys. 13.

tych trudności, turbiny tego rodzaju posiadają zwykle ustrój sprzężony, w którym część wysokoprężna i niskoprężna są umieszczone w osobnych osłonach, a każda część pędzi osobny generator elektryczny, pracujący czasami na osobną sieć. Reakcyjna część wysokoprężna zmusza do stosowania regulacji zapomocą dławienia pary świeżej. W części niskoprężnej para płynie przez pierwszą część wieńców łopatkowych, umieszczonych na bębnie, w jednym kierunku, a potem przez dwie dalsze części, ułożone po obydwóch stronach części pierwszej, w kierunkach przeciwnych. Ponieważ konstrukcję bębna można stosować naogół tylko przy prędkości obwodowej (mierzonej do środka wieńca bębna) $u = 125$ m/sek, umieszczono tutaj kilkanaście ostatnich wieńców łopatkowych na kołach z rozszerzonymi wieńcami (podobnie jak na rys. 42).

Turbina fabryki Westinghouse'a, ustawiona w New-Yorku, o mocy normalnej 60 000 kW, a o mocy maksymalnej 70 000 kW przy $n = 1500$ obr/min i ciśnieniu admissyjnym 15 atm nadciśn. i 300° Cels. — składa się z trzech części, umieszczonych w osobnych osłonach, z osobnymi generatorami elektrycznymi, mianowicie jednej wysokoprężnej, umieszczonej pomiędzy dwiema niskoprężnymi. Każda z tych części jest zbudowana według zasad, przedstawionych na rys. 13, więc każda część niskoprężna posiada po dwie rury wypustowe, prowadzące do osobnych kondensatorów, których cała turbina posiada cztery. Przez podział silnika na kilka części składowych otrzymuje się stosunkowo niewielkie wymiary poszczególnych średnic i niewielkie prędkości obwodowe, np. w turbinie o maksymalnej mocy 70 000 kW wynosi średnia średnica (mierzona do środka wysokości łopatek) największych wieńców łopatkowych 2230 mm, a odnośna prędkość obwodowa $u = 175$ m/sek. Stosowanie podobnych środków konstrukcyjnych wskazuje bodaj na to, że Amerykanie mają chwilowo pewne trudności w opanowaniu kwestji jakości używanych

materiałów. Ponieważ jednakże całość turbiny składa się właściwie z trzech silników, a każdy z nich posiada bardzo wielką długość, konstruktor europejski wybrałby z pewnością budowę trzech oddzielnych agregatów po 20000 kW, stosując zarazem większą liczbę obrotów, lub też zdecydowałby się zbudować jedną możliwie krótką turbinę o mocy 60000 kW w jednej osłonie przy użyciu najlepszych materiałów i zastosowaniu większych prędkości obwodowych.

§ 7. Wielostopniowe osiowe turbiny akcyjne.

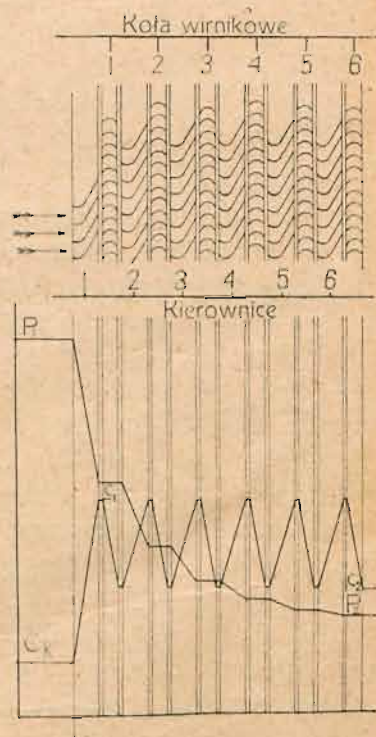
Myślą przewodnią przy powstaniu powyższego systemu było zbudowanie turbiny możliwie krótkiej, posiadającej uszczelnienia pomiędzy poszczególnymi stopniami ciśnienia, a biegnącej z taką liczbą obrotów, która pozwala na bezpośrednie połączenie z generatorem elektrycznym. W celu uzyskania turbiny krótszej niż turbina Parsons'a, należało zastosować niezbyt wielką liczbę stopni ciśnienia, wskutek czego otrzymuje się znaczną prędkość pary w poszczególnych stopniach. Ostatnia wymaga, ze względu na dobry współczynnik sprawności turbiny, stosowania znacznych prędkości obwodowych. Aby liczba obrotów wału turbinowego nie przekraczała dopuszczalnej przez generator elektryczny, należało wykonać stosunkowo duże średnice wirników, które zmuszają do zasilania pierwszych wirników na części obwodu ich wieńców. Częściowe zasilanie wymaga, jak już zaznaczono, stosowania turbiny akcyjnej.

Twórcami wielostopniowych osiowych turbin akcyjnych są prof. Rateau z Paryża (około r. 1900) i dyrektor Zoelly z Zurychu (w r. 1903). Zbudowane przez nich turbiny nie różnią się zasadniczo, lecz tylko konstrukcyjnie. Z powodu odpowiedniejszej konstrukcji i mniejszej liczby stopni ciśnienia turbina Zoelly'ego znalazła większe rozpowszechnienie.

Wielostopniowa osiowa turbina akcyjna składa się z pewnej liczby wirników, przed którymi znajdują się przynależne kierownice. Para rozpręża się tylko w łopatkach kierowniczych, posiada natomiast to samo ciśnienie po obydwu stronach łopatek poszczególnych wirników, skutkiem czego tłoki odciążające są zbyteczne. Spadek prężności pary w poszczególnych stopniach ciśnienia oraz zmianę prędkości pary uwidocznia rys. 14. Wynika z niego, że ciśnienie spada prędzej w pierwszych stopniach niż w następnych i że prędkość pary jest większa niż w turbinach Parsons'a.

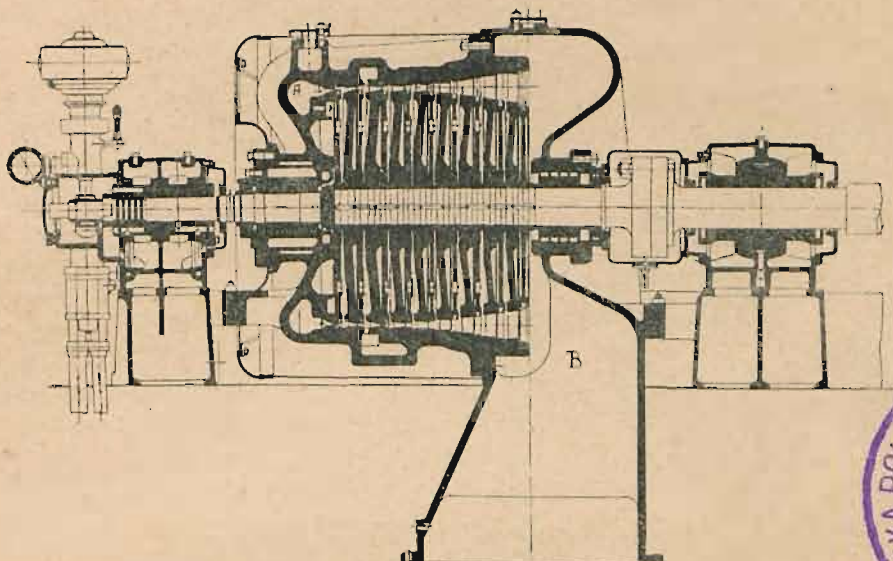
Skutkiem tego należy łopatki przymocowywać starannie do wirników i wykonać je z materiału, który nie ulega łatwo zdzieraniu przez parę. Odległość pomiędzy poszczególnymi wieńcami łopatkowymi wirników i kierownic jest niewielka, tak że prędkość, którą posiada para przy opuszczaniu pewnego wieńca wirnikowego, nie zostaje całkowicie stracona.

Pierwotne turbiny powyższego rodzaju posiadały przy średniej mocy aż do 25 stopni ciśnienia, nowoczesne natomiast mają tylko 6 do 9 stopni przy $n = 3000$ obrotów na



Rys. 14.

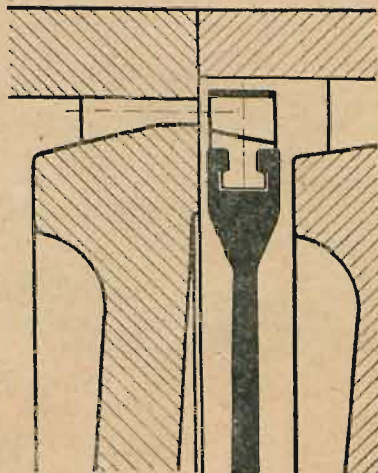
minutę i mocy aż do 25000 kW, 10 stopni przy $n = 1500$, ostatnie wykonywa się o mocy do 40000 kW w jednym silniku. Równocześnie konstruktorzy starają się o zasilanie możliwie największej liczby wirników na całym obwodzie wieńców, zmniejszając w ten sposób opory wentylacyjne, tak że tylko kilka pierwszych (2 do 4) jest częściowo zasilanych.



Rys. 15.

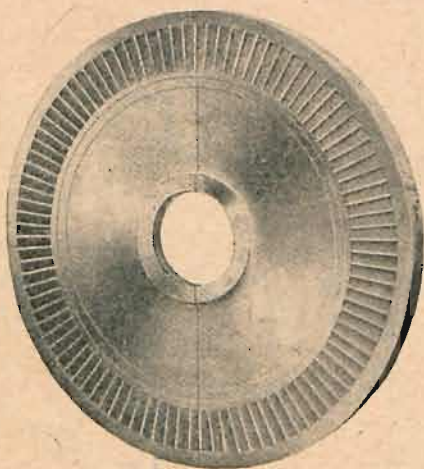
Całość 9-stopniowej turbiny akcyjnej znajduje się na rys. 15. Para świeża wchodzi przez wlot A, a po oddaniu pracy w turbinie uchodzi całkowicie rozprężona przez wylot B do kondensatora. Na wale turbinowym osadzone są całkowicie toczone i polerowane koła wirnikowe, zaopatrzone w łopatki, a wykonane ze stali zlewnej Siemens-Martina. Łopatki w części wysokoprężnej są najczęściej ze stali niklowej, a w części niskoprężnej ze spiżu, lub ze stali niklowej, lecz pocynkowanej, a są wtedy polerowane, aby zmniejszyć opory tarcia i zapobiedz uszkodzeniom. Szczeliny pomiędzy zewnętrznymi obwodami wirników a osłoną turbinową, względnie wystającą częścią kierownicy, mogą być dość duże, 4 do 5 mm, bez obawy o straty pary przez nieszczelności, ponieważ ciśnienie pary po obydwu stronach wirnika jest jednakowe (patrz rys. 16). Często umieszcza się nawet w wirnikach części wysokoprężnej i średnioprężnej, jak to wynika z rys. 15, kilka otworów, aby wyrównać ewentualnie zachodzącą różnicę ciśnień po obydwu stronach wirnika.

W celu ograniczenia przepływającego strumienia pary znajduje się pierścień na zewnętrznym obwodzie wieńca łopatkowego wirników. Przed pierwszym wirnikiem jak i pomiędzy poszczególnymi wirnikami umocowane są w osłonie turbinowej dwudzielne koła kierownicze, wykonane z żelaza lanego, a zaopatrzone w łopatki z blachy niklostalowej. Stratom pary, któreby zachodzić mogły z powodu różnicy ciśnień po obydwu stronach kierow-



Rys. 16.

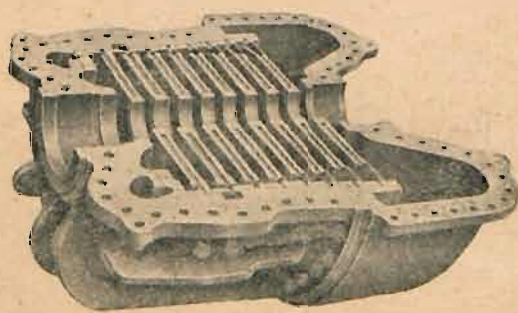
nic, zapobiega się tutaj przez zastosowanie uszczelnień na możliwie najmniejszym obwodzie, tuż przy piastach wirników. Wobec tego, nawet przy niezupełnej ich szczelności, nie zachodziłyby zbyt wielkie straty. Ze względu na uzyskanie możliwie największej niezawodności biegu turbiny nie używa się w tem miejscu uszczelnienia grzebieniastego o podwójnym grzebieniu, tylko o pojedynczym, mianowicie piasty wirników są gładkie, a grzebienie znajdują się tylko w piastach kół kierowniczych. Niektóre fabryki wyko-



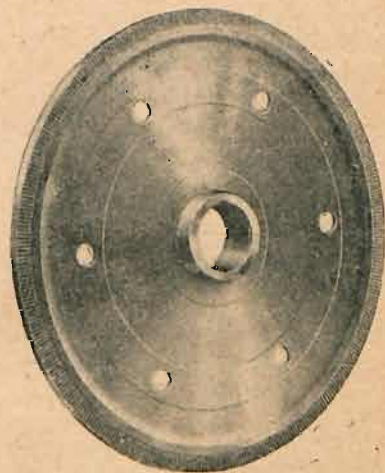
Rys. 17.

nywują zamiast powyższego uszczelnienia przy większych różnicach ciśnień stałe uszczelki pierścieniowe, składające się z mieszaniny węgla z grafitem, które także nie wymagają smarowania oliwą Para, uchodząca z turbiny, może więc również służyć bezpośrednio do zasilania kotłów. Regulacja turbiny odbywała się dawniej wyłącznie zapomocą dławienia wszystkiej pary dolotowej, obecnie natomiast stosuje się coraz częściej regulację kombinowaną, przy użyciu kilku wentyli dławiących, dającą możliwość zmieniać stopień zasilania pierwszego wirnika, co wpływa korzystnie na spożycie pary przy zmniejszającym się obciążeniu silnika.

Zewnętrzny wygląd najważniejszych części turbiny Zoelly'ego, w wykonaniu fabryki Zgorzelickiej, uwidoczniają fotografie, mianowicie rys. 17 przedstawia koło kierownicze, rys. 18 układ kierownic w górnej części osłony, a rys. 19 wirnik wysokoprężny. Średnice wirników wynoszą 750 mm do 3000 mm, zależnie od liczby obrotów i wielkości turbiny.



Rys. 18.



Rys. 19.

Wielostopniowe turbiny jakcyjne posiadają w porównaniu z turbiną Parsons'a następujące zalety: budowa całości jest znacznie krótsza, odlew osłony jest prostszy, koszt wykonania są mniejsze, niezawodność biegu jest większa;—z powodu braku łódek odciążających i stosowania dużych szczelin ponad wieńcem łopatkowym wirników, turbina może w każdej chwili podjąć pracę bez poprzedniego dłuższego ogrzewania jej,

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