

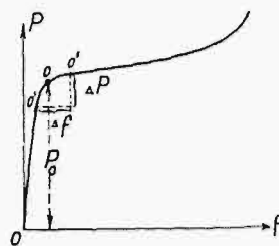
dzlemy niżej nazywali równowagą quasi-nie-  
stateczną pręta ściskanego mimośrodowo.

Siła krytyczna  $P_k$  może być rozpatrywana na  
podstawie wykresu rysunku 9, jako granica sił  $P_{00}$ ,  
wyrażonych w funkcji mimośrodów, czyli że

$$P_k = \lim_{a \rightarrow 0} P_{00}|_{a=0} = \lim_{a \rightarrow 0} F_2(a)|_{a=0} \quad (5)$$

Przy wyznaczaniu siły krytycznej dla pręta  
sprężystego drogą doświadczalną uzyskanie zu-  
pełnie ściśle osiowości obciążenia podłużnego nie  
jest możliwe, dlatego też drogą doświadczalną  
uzyskujemy właściwie bezpośrednio nie siłę  $P_k$ , lecz  
jedną z sił  $P_{00}$ . Dla małych mimośrów siły po-  
dłużnej, jak widać z rys. 9, siła  $P_{00}$  szybko zdąża  
do  $P_k$ , tak iż przy dobrej aparaturze doświadcz-  
nia siła  $P_k$  mało różni się od teoretycznie wyzna-  
czonej siły Eulera  $P_E$ .

Ze względu na omówione wyżej okoliczności,  
towarzyszące zjawisku wyboczenia sprężystego,  
możemy dla tego zjawiska ustalić następujące okre-  
ślenie:



Rys. 12.

tość, zwaną siłą krytyczną.

Wyboczenie sprężyste  
jest to zjawisko, polegające  
na tym, że pręt sprężysty,  
pierwotnie prosty i ściska-  
ny siłami podłużnymi ściśle  
osiowymi, zakrzywił się pod  
działaniem pewnej chwilo-  
wej przyczyny zewnętrznej,  
nie wraca, po usunięciu tej  
przyczyny, do swego kształ-  
tu prostoliniowego, o ile siła  
podłużna przekroczyła war-

(d. n.)

## Obecny stan budowy turbin parowych<sup>\*)</sup>.

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

**T**urbiny promieniowe *Ljungstroema*, wykony-  
wane przez Sp. Akc. Asea, są w literaturze  
polskiej już szczegółowo opisane. Obecnie  
buduje się je również dla ciśnień 5 atm. i 450° C  
oraz mocy 50000 kW przy 3000 obr./min (rys. 29).

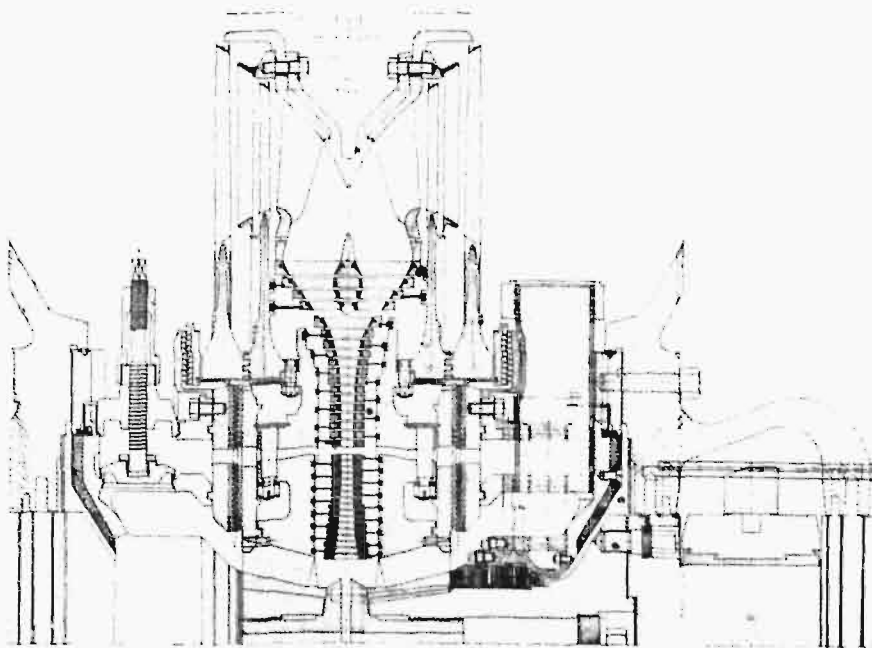
Największą trudność przy stosowa-  
niu wysokich ciśnień i wysokich  
temperatur  
pary dolo-  
towej spra-  
wiają koro-  
zję, erozję  
oraz pęta-  
nie materia-  
łu łopatek  
turbino-  
wych.

Korozjom  
w czasie po-  
stępu można  
zapobiec przez  
należyte osusze-  
nie wnętrza tur-  
biny po jej za-  
trzymaniu i bez-  
względne nie-  
dopuszczenie do  
kadłuba oparów  
z rurociągów.  
Korozje łopa-  
tek w ru-  
chu turbiny  
zachodzą w  
stopniach ci-  
śnienia, w których para przechodzi ze stanu prze-  
grzania w stan nasycenia. Powodem ostatnich koro-  
zji jest za duża zawartość w parze tlenu lub  
dwutlenku węgla lub też kwasów. Wynika z tego,  
że woda zasilająca kotły powinna być jak najsta-  
ranniej odgazowana i nie powinna zawierać che-

mikalji, których używa się do zmiękczenia jej.  
Również trzeba zwrócić baczną uwagę na szczel-  
ność rurek kondensatorowych, aby woda chłodząca  
nie mogła dostać się do skroplin, których używa się  
do zasilania kotłów.

Erozje łopatek zachodzą tak w części  
niskoprężnej turbiny kondensacyjnej, jak i w czę-  
ści wysokoprężnej.

Powodem  
ich w części ni-  
skoprężnej jest  
nadmierna wil-  
gotność pary,  
która jest tem  
większa, im  
większe jest ci-  
śnienie dolo-  
towe. Jak zazna-  
czyłem, wzrost  
temperatury pa-  
ry dolo-  
towej jest  
znacznie mniej-  
szy od wzrostu  
ciśnienia, a w  
Europie stosowa-  
nie podwój-  
nego przegrze-  
wania nie znaj-  
duje zwolenni-  
ków. W Euro-  
pie przy bardzo  
wysokim ci-  
śnieniu pary do-  
lotowej prze-



Rys. 29. Turbina Ljungströma 50 atm, 450° C, 50 000 kW, 300 obr./min.

grzewa się czasem parę za cylindrem wysoprężnym  
zapomocą pary dolo-  
towej. Uczyniła to np. Elektrow-  
nia w Trzebowicach (C. S. R.), budowana obecnie  
dla ciśnienia kotłowego 130 atm i 500° C, w której  
fabryka *Škoda* ustawia dwa turbogeneratory po  
21 000 kW dla 124 atm i 480° C; — para za cylin-  
drem wysoprężnym ma być ogrzewana parą świeżą  
do około 340° C. Ponieważ materiały o cenie

<sup>\*)</sup> Dokończenie do str. 305 w zesz. 27—28 z r. b.

względnie przystępnej opanowują w sposób dość zadawalający wilgotność pary aż do 10%, przeto konstruktorzy, jak to wynikało z szeregu przedstawionych rysunków, starają się możliwie najlepiej odprowadzać wodę z części niskoprężnej i nadawać w niej łopatom odpowiednie kształty oraz zastępować bandaże drutami wzmacniającymi.



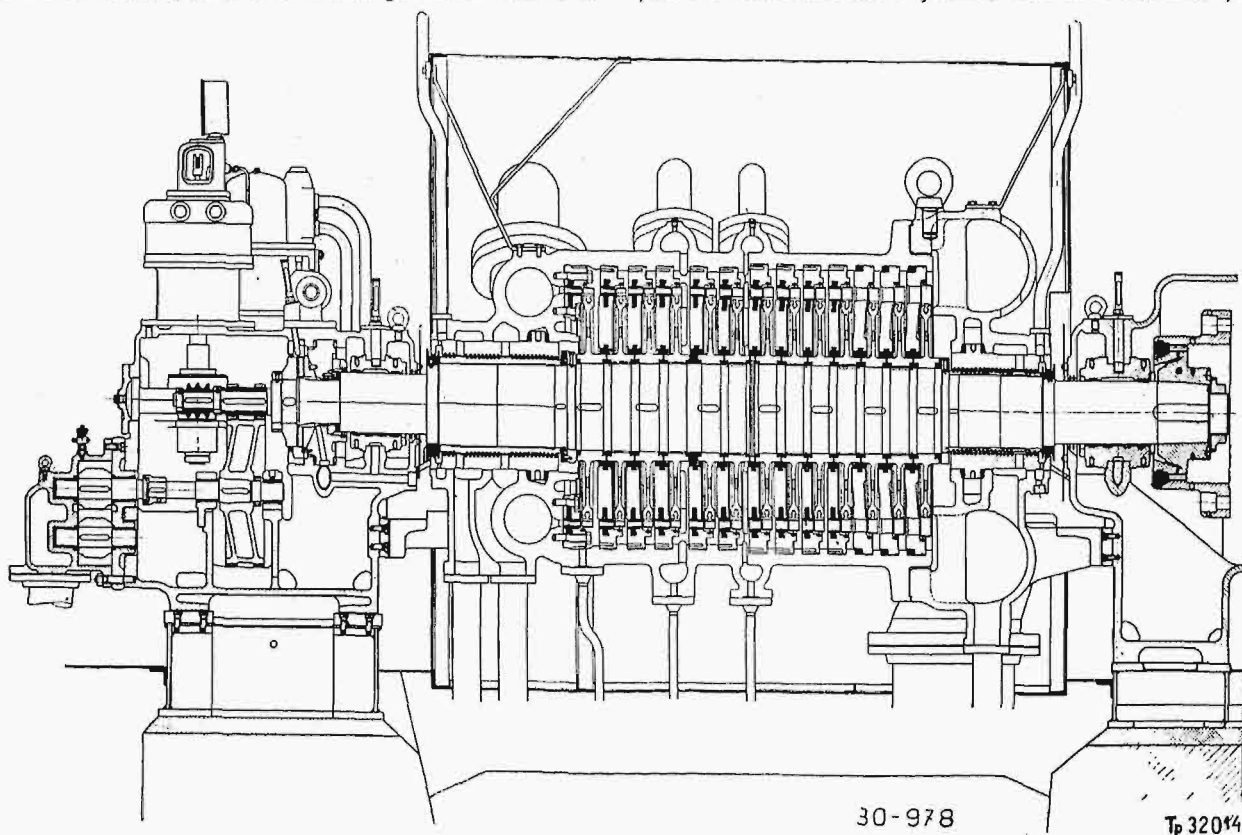
Rys. 30. Przykład erozji łopatek w stopniu regulacyjnym.

W części wysokoprężnej erozja powstaje przeważnie przez porywanie wody z kotła, t. zw. plucie kotła, które w wielkiej mierze zależy także od jakości wody zasilającej. Może ona powstać także, u-

jawniając się w postaci wylizania materiału dysz i łopatek wirnikowych, przy stosowaniu zbyt dużej prędkości pary. Wypadek ten zachodzi przede wszystkim w typach, których wytwórnia używa w celu zmniejszenia kosztów budowy dla znacznie różniących się spadków adyabatycznych, np. ten sam typ dla 14 atn i 320° C oraz dla 22 atn i 400° C, zmieniając tylko opanowywany przez stopień regulacyjny spadek adyabatyczny, a pozostawiając bez zmiany resztę stopni ciśnienia. Jako przykład takiej erozji w kole regulacyjnym może posłużyć rys. 30.

Pełzania materiału, czyli stopniowego wydłużania się jego przy wysokiej temperaturze i długotrwałym obciążeniu, należy obawiać się tylko w łopatkach części wysokoprężnej, przy stalach niklowych przy temperaturze powyżej 300° do 350° C. Oprócz tego materiał może zmieknąć przy bardzo wysokiej temperaturze pary.

Zmienione warunki pracy turbiny spowodowały znaczną zmianę w używaniu materiałów na łopatki. Mosiądz, tak bardzo ceniony dla łatwej obróbki i dużej odporności na korozję, może być używany tylko w turbinach o mniejszej mocy przy temperaturze poniżej 200° C. Bronz z domieszką 10% niklu, dawniej chętnie stosowany na łopatki niskoprężne, zniknął w turbinie prawie zupełnie, ponieważ posiada zbyt niską granicę plastyczności (płynności) i za małą odporność na erozję. Wyjątkowo odporny na korozję jest metal Monel'a, który posiada licznych zwolenników, zwłaszcza w marynarce angielskiej; — odporność jego na erozję jest względnie zadawalająca. Wytwórnie kontyngentu europejskiego niechętnie stosują metal Monel'a. Cena jego jest bowiem bardzo wysoka, obróbka trudna, jed-



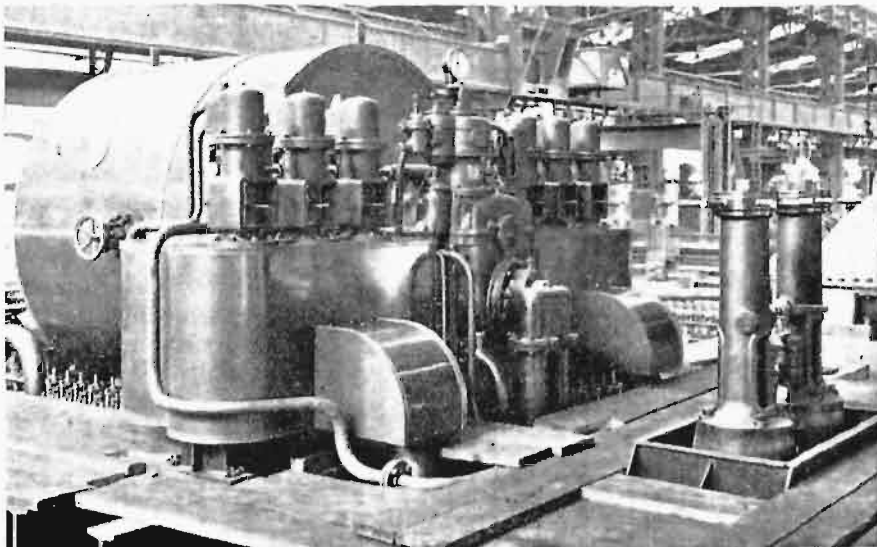
Rys. 31. Turbina przeciwnieprężna fabr. Škoda, 9000 kW, 3000 obr./min.

nolitość otrzymywanego materiału pozostawia dużo do życzenia, bo nawet przy ścisłej kontroli zachodzą wypadki z łopatkami, — granica plastyczności (płynności) jest za mała, aby mógł on być używany

więcej chromowych, przeto konstruktorzy fabryk turbin parowych uchwalili na dorocznym zebraniu w r. 1931 używać na łopatki wyłącznie tej stali, choć niewiadomo, czy uchwała ta będzie respektowana.

Wspomniane stale nierdzewiejące są to stale o zawartości chromu 12% do 16% i niklu 0,5% do 2%, wyrabiane sposobem Martina, bo stale austenityczne, które nie tak łatwo rdzewieją, nie mogą być używane na łopatki ze względu na zbyt niską granicę plastyczności (płynności) i niemożność hartowania ich. Stale chromowe, czy to wyrobu angielskiego, jak Stainless Iron, czy też wyrobu Kruppa V5M lub Huty Poldi KA<sub>2</sub>, posiadają wyższą granicę plastyczności i trwałej wytrzymałości od 5% stali niklowej, lecz rdzewieją także, a odporność ich na erozję jest nieznacznie lepsza od 5% stali niklowej.

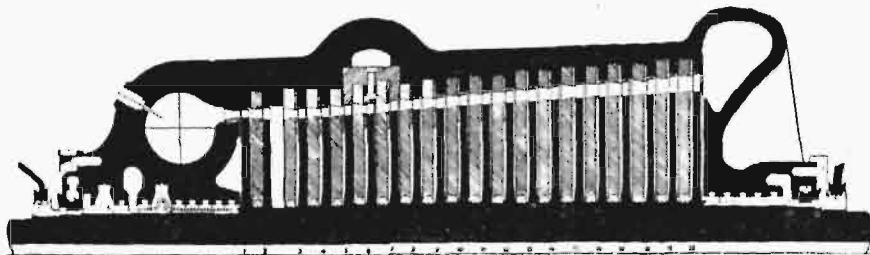
Ze względu na wielkie koszty i kłopoty przy wymia-



Rys. 32. Widok turbiny przeciwpięrznej, podane! na rys. 31.

na łopatki niskoprężne dużych turbin, granica pełzania nie pozwala stosować go przy temperaturach powyżej 350° C, przy których oprócz tego łuszczy się. Wynika z tego, że materiał ten jest najodpowiedniejszy na łopatki części średnioprężnej.

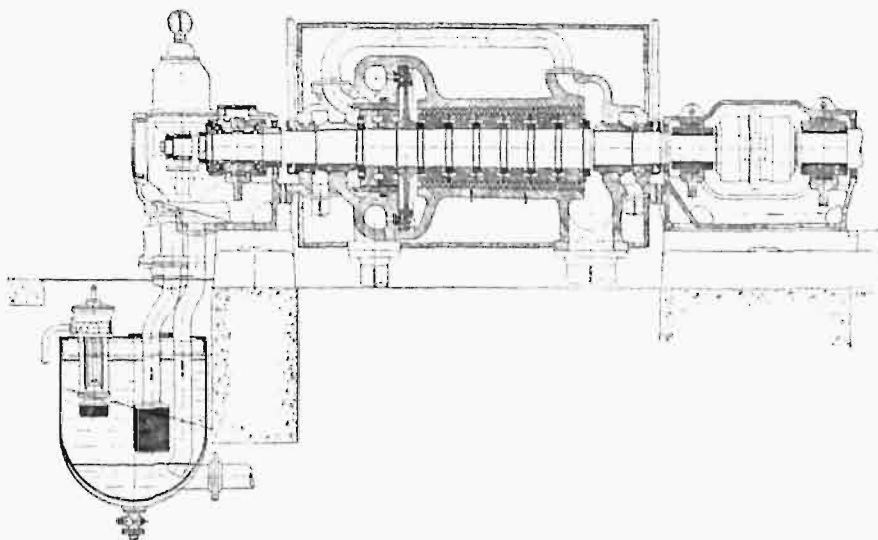
W wielkich turbinach współczesnych używa się na łopatki prawie wyłącznie różnych stopów stali. Najwięcej rozpowszechniona jest 5% stal niklowa, stosowana nągól przy temperaturze pary aż do 400°, choć wytrzymałość jej trwała przy temperaturze powyżej 300° C znacznie zmniejsza się. Ponieważ stal ta posiada odporność na korozję i erozję nieznacznie gorszą od kosztowniejszych stali nierdze-



Rys. 33. Turbina przeciwpięrzna budowy Pierwszej Berneńskiej Fabryki. Moc 4500 kW przy 3000 obr./min. Przełęk 50 t/h.

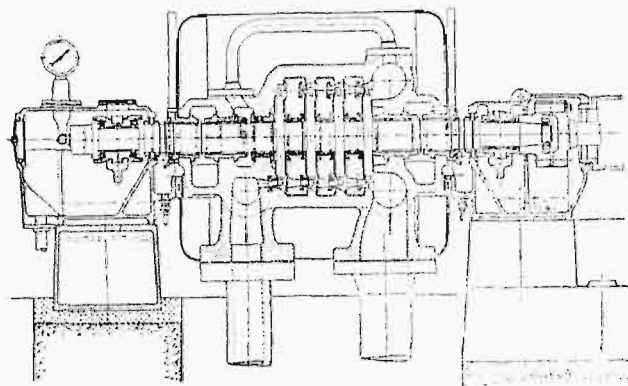
nie łopatek turbinowych, wytwórnie zaczęły pod naciskiem odbiorców turbin szukać materiałów odporniejszych. Jako takie, wymienić można stale nierdzewiejące o dużej zawartości chromu i niklu, np. stal francuską ATV, posiadającą 36% niklu i 12% chromu, oraz stal Kruppa B7M, posiadającą 60% niklu, 15% chromu i 7% molibdenu. Obie dwie stale posiadają wyższą granicę wytrzymałości trwałej, zwłaszcza B7M, od zwykłych stali nierdzewiejących oraz znacznie większą odporność na korozję i erozję, a miękną dopiero przy temperaturze powyżej 500° C. Najsłabszą ich stroną jest zbyt wysoka cena, która u stali ATV jest 3razy, a u stali B7M — 5 razy wyższa od tak zwanych stali nierdzewiejących.

W turbinach przeciwpięrznych, czołowych i pracujących z pobieraniem pary stosowanie wysokiego ciśnienia pary dolotowej przynosi znacznie większe korzyści niż w turbinach kondensacyj-



Rys. 34. Turbina czołowa Curtis-Parsons na ciśn. do 100 atm przy 450° C.

nych. Zasady budowy tych typów są takie same, jak w turbinach kondensacyjnych.



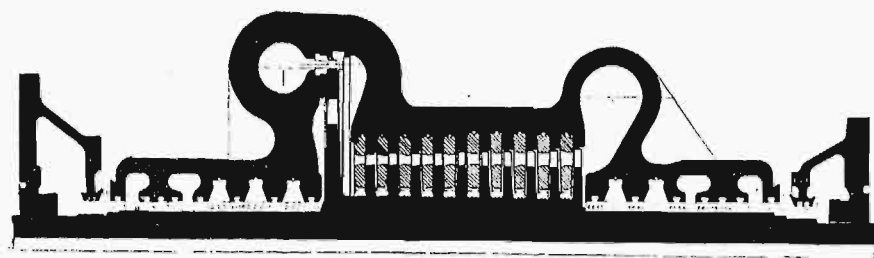
Rys. 35. Akcyjina turbina czołowa 4000 kW wylw. Parsonsa na ciśn. 200 atn ( $p_1=56$  atn), 7500 obr./min.

Turbiny przeciwprężne zdobywają obecnie większe znaczenie w centralach elektrycznych. Ostatnie bowiem zaczynają, w celu zwiększenia rentowności, sprzedawać oprócz prądu także parę do celów fabrykacyjnych i grzejnych. Jako przykład, może posłużyć centrala w Brnie, która przy ciśnieniu kotłowym 65 atn i  $430^\circ\text{C}$ , posiada narazie trzy turbiny o łącznej mocy 18 000 kW ( $p_1=60$  atn,  $t=400^\circ\text{C}$ ,  $p_2=8$  atn) i turbinę kondensacyjną o mocy 6 000 kW dla ciśnienia dolotowego 7,5 atn, pracującą tylko w okresach małego zapotrzebowania pary do celów fabrykacyjnych. Turbinę przeciwprężną o mocy 9 000 kW przy 3000 obr./min, wykonaną przez fabrykę Skoda, widzimy na rys. 31;—moc najekonomiczniejsza wynosi 7 200 kW, a największa moc przejściowa 10 000 kW. Turbina ta posiada 13 całkowicie zasilanych stopni akcyjnych. Pierwsze 10 stopni są zaopatrzone w całkowicie obrobione łopatki kierownicze, ostatnie 3 stopnie natomiast — w łopatki zalane. W celu uniknięcia ujemnych skutków nierównego wydłużania się promieniowego kadłuba i tarcz kierowniczych, znajdują się w ostatnich obwodowe podcięcia, dzięki którym mogą sprężynować. Ze względu na pracę z przeciwprężnością turbina jest wyposażona w regulację ilościowo-jakościową za pomocą 6 zaworów regulacyjnych, umieszczonych w 2 skrzyniach, a ułożonych po

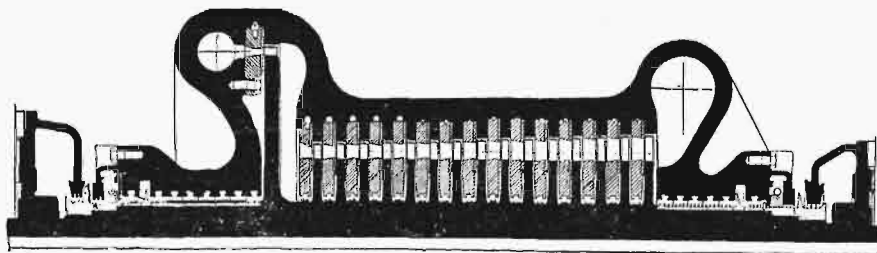
obu stronach przedniego łoża (rys. 32). Cztery zawory doprowadzają parę przed pierwszy stopień ciśnienia, a dwa dalsze przy dużym obciążeniu przed piąty stopień ciśnienia.

Dla tej samej centrali w Brnie i ciśnien powyżej zaznaczonych zbudowała Pierwsza Berneńska Fabryka dwie turbiny przeciwprężne o mocy po 4 500 kW przy 3000 obr./min dla przełyku 50 t/h. Turbina (rys. 33) składa się z koła U jako stopnia regulacyjnego i 18 stopni akcyjnych, których średnice stopniowo wzrastają, dzięki czemu otrzymuje się wyższe łopatki na początku turbiny. Dla przeciążenia wprowadza się parę dodatkową za czwarty stopień akcyjny.

Sp. Akc. Brown-Boveri buduje natomiast dla ciśnienia aż do 100 atn i  $450^\circ\text{C}$  turbiny czołowe typu Curtis-Parsons (rys. 34), a dopiero dla ciśnień wyższych typ akcyjny, np. dla centrali w Langerbrugge dla mocy 4 000 kW turbinę o 4 stopniach ciśnie-

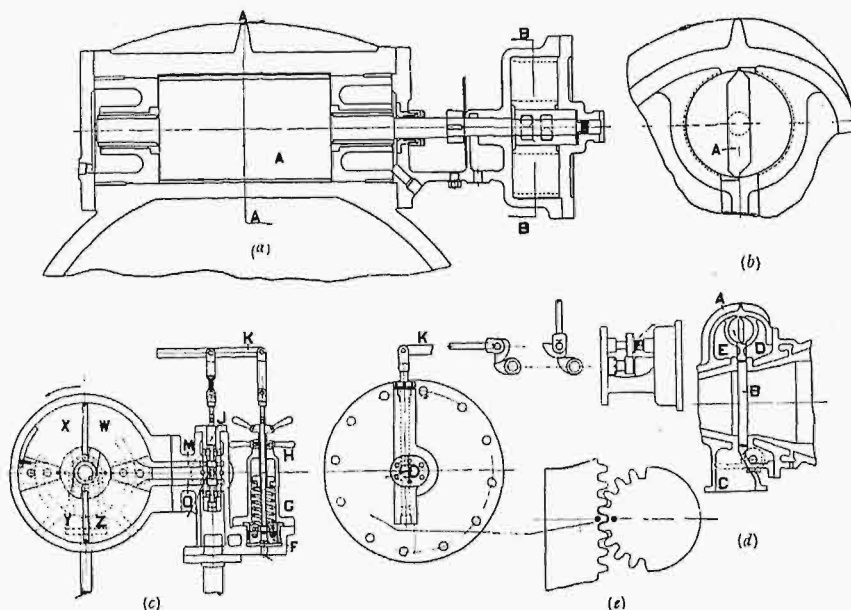


Rys. 36. Cylinder wysokoprężny.



Rys. 37. Cylinder niskoprężny.

Rys. 36 i 37. Turbina przeciwprężna Pierwszej Berneńskiej Fabryki. Moc 2700 kW, 6000 obr./min, 65 atn,  $450^\circ\text{C}$ . Przełyk 32,5 t/h.



Rys. 38. Regulacja bud. wytwórni Parsons do turbin z pobieraniem pary.

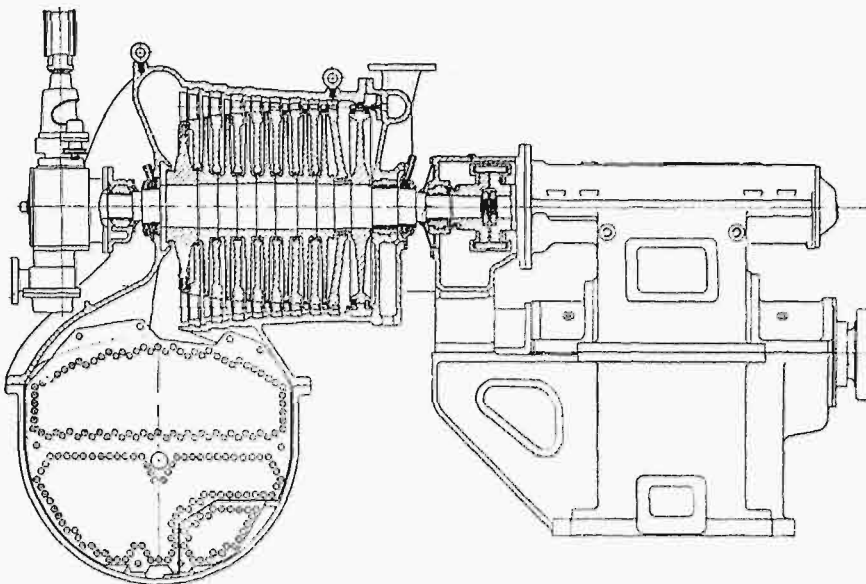


nia (rys. 35), z których tylko ostatni jest całkowicie zasilany. Turbina ta zbudowana została dla  $p_1=200$  atn,  $p_2=56$  atn,  $n=7500$  obr/min.

Przy wysokich ciśnieniach dolotowych, a niezbyt dużej przeciwpężności buduje się nawet turbiny

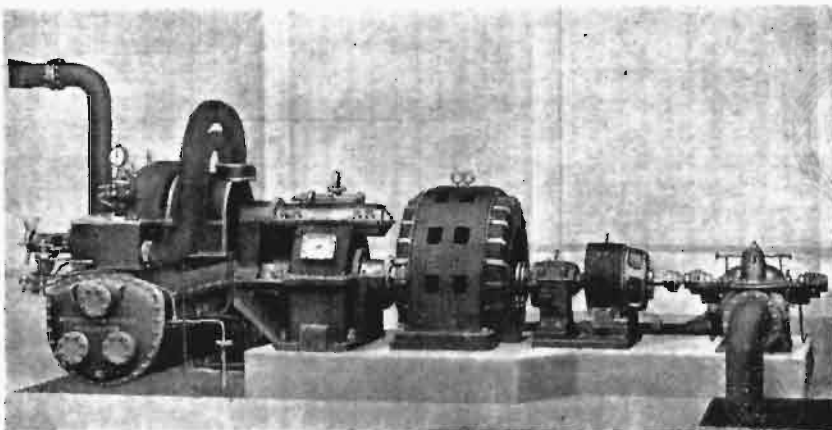
pień akcyjny o większej i 15 stopni akcyjnych o mniejszej średnicy. W obydwóch cylindrach koła regulacyjne są znacznie większej średnicy od innych kół, przez co uzyskuje się lepszą sprawność turbiny tak przy pełnym obciążeniu, jak i zmniejszonym. Tak pobieranie pary, jak i przeciwpężność są regulowane zapomocą rurek strumieniowych Askania, opisanych w literaturze polskiej.

Jako interesujący szczegół konstrukcyjny, przytaczam regulację, stosowaną przez Sp. Akc. Parsons w turbinach pracujących z pobieraniem pary (rys. 38). Część wysokoprężna oddzielona jest od niskoprężnej obrzeżem B. Para płynie z części wysokoprężnej przy C do celów fabrykacyjnych, a reszta jej przez przestrzeń E, klapę dławiacą A i przestrzeń D — do niskoprężnej części turbiny. Położenie klapy A jest ustawiane serwowatorem z tłokiem obrotowym, widocznym w przekroju B — B.

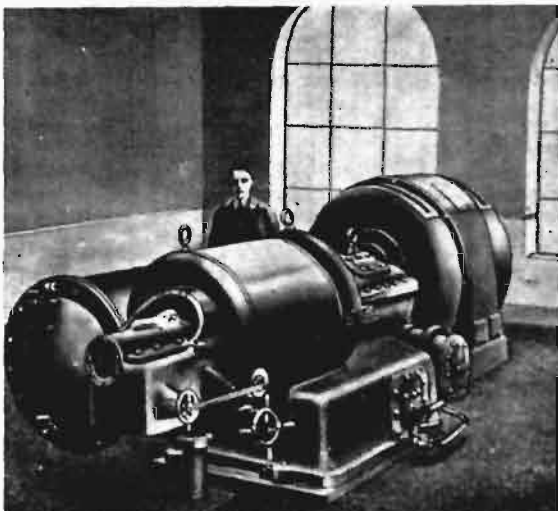


Rys. 39. Turbina zmontowana na skraplaczu (Vickers).

o średniej mocy jako dwukadłubowe. Jako przykład, podaję turbinę, wykonaną przez *Pierwszą Berneńską Fabrykę* dla mocy 2700 kW przy 6000 obr/min z przekładnią zębatą do 2520 obr/min (rys. 36 i 37), a pracującą z  $p_1=65$  atn,  $t_1=450^\circ\text{C}$  i  $p_2=3$  atn. Przepływ turbiny 32,5 t/h. Z turbiny tej pobiera się parę za cylindrem wysokoprężnym o ciśnieniu 18 atn w ilości aż do 19 t/h. Cylinder wysokoprężny posiada jeden stopień akcyjny o większej średnicy i 10 stopni akcyjnych o mniejszej średnicy (rys. 36), a cylinder niskoprężny (rys. 37) — jeden sto-



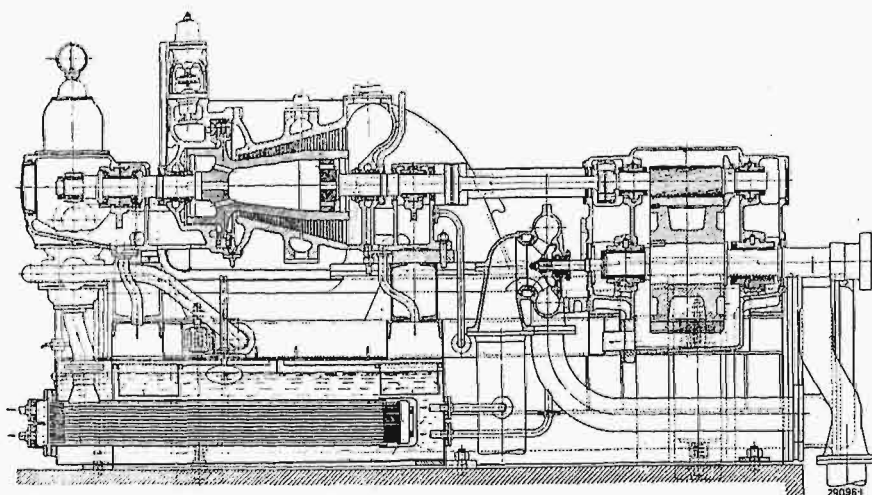
Rys. 40. Widok turboprądnicy Vickersa (do 6250 kW) z turbiną ustawioną na skraplaczu.



Rys. 41. Turbina Parsonsa o mocy 250 kW ze skraplaczem, przytwierdzonym do kadłuba turbiny.

### III. Zmniejszenie kosztów inwestycyjnych.

Zmniejszenie kosztów inwestycyjnych wymaga przede wszystkim takiego ograniczenia liczby kadłubów, które zapewnia niezawodną pracę przy dobrej sprawności. Przed siedmiu laty, więc w okresie, w którym jedna wytwórnia starała się prześcignąć drugą większą liczbą stosowanych kadłubów (np. dla mocy 10 000 kW przy 10 atn i  $300^\circ\text{C}$  budowano trójkadłubowe turbiny), wypowiedziałem w artykule p. t. „Nowe dążenia w budowie turbin i maszyn parowych” zapatrywanie, iż stosowanie większej liczby kadłubów, niż tego wymagają niezawodność biegu i sprawność silnika, nie jest usprawiedliwione ze względów gospodarczych. Rozwój budowy turbin w ostatnich latach, pomimo bardzo znacznego wzrostu ciśnienia i temperatury pary dolotowej, potwierdził w zupełności słuszość powyższego zdania.

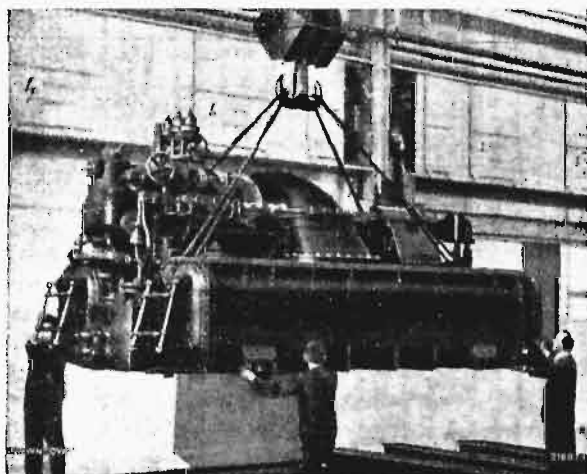


Rys. 42. Turboprądnica Brown-Boveri o mocy 1500 kW, 7500/1500 obr. min., ustawiona na skraplaczu.

Może jeszcze w większej mierze na zmniejszenie kosztów budowy siłowni wpływa ustawianie jednostek o bardzo dużej mocy, pracujących przy dużej liczbie obrotów. Oczywiście, najkorzystniejsze wyniki w tym względzie osiąga się w turbogeneratorach układu posobnego, wymagających tylko jednej prądnicy, a jako dobitny przykład może posłużyć turbina o mocy 60 000 kW przy 3000 obr./min, przedstawiona na rys. 25. Układ compound, chętnie wykonywany w Ameryce, jest oczywiście kosztowniejszy od układu tandem.

W ostatnim czasie uwydatniła się także dążność do budowy turbin kondensacyjnych, przeciążalnych w szerokich granicach. Celem tej konstrukcji jest opanowanie szczytów obciążeń w elektrowniach bez ustawiania dodatkowych silników, względnie kosztownych urządzeń z ciepłarkami.

Koszty fundamentów i montażu są przy turbogeneratorach osiowych stosunkowo duże w porównaniu z ceną samego silnika, zwłaszcza przy mniejszej jego mocy. Celem zmniejszenia kosztów fundamentów można ustawić turbinę na kondensatorze, przez co zmniejszają się również poważnie koszty jej montażu. Na drogę tę wkroczył jako pierwszy *Vickers*, który stosuje tę budowę przy mocy aż do 6 250 kW (rys. 39 i 40). Wał turbiny napędza tutaj prądnicę zapomocą przekładni zębatej, a przy końcu jej wału znajduje się



Rys. 43. Widok turbiny Brown-Boveri 1500 kW (rys. 42).

pompa do wody chłodzącej. *Sp. Akc. Parsons* przytwierdza natomiast kondensator do kadłuba turbiny, jak to wynika z rys. 41, przedstawiającego turbinę o mocy 250 kW, zbudowaną jako typ *Curtis-Parsons*. Również firma *Asea* układa swą turbinę promieniową na kondensatorze.

Fabryka *Brown-Boveri* zwróciła również szczególną uwagę na zmniejszenie kosztów fundamentów. Na rys. 42 i 43 widzimy budowę jej „turbloku” o mocy 1500 kW. Liczba obrotów turbiny wynosi 7500, a prądnicy 1500. Wał turbiny napędza bezpośrednio pompy do wody i do kondensatu zapomocą przekładni zębatej. Kadłub turbiny i skrzynka przekładni zębatej

spoczywają na dwóch prostokątnych kondensatorach, ułożonych po obu stronach kadłuba, prądnica natomiast spoczywa na osobnym fundamencie lub konstrukcji żelaznej. Zbiorniki i chłodnica oleju znajdują się pomiędzy kondensatorami. *Brown-Boveri* wykonała projekt nawet trójkadłubowej turbiny, w której cylindry wysoko i średniopiętny oraz prądnica spoczywają na konstrukcji żelaznej, a cylinder niskopiętny na kondensatorach. Wątpić jednak należy, aby ten typ mógł znaleźć rozpowszechnienie.

Przedstawiony rozwój turbin parowych w ostatnich latach osiągnięto dzięki wysiłkom konstruktorów i metalurgów. Dalszy postęp możliwy jest tylko przy ścisłej współpracy tych dwóch czynników, zwłaszcza, że musimy opanować jeszcze wyższe temperatury.

## Nowe wydawnictwa<sup>\*)</sup>.

**Przepisy budowy i ruchu urządzeń elektrycznych prądu silnego.** Wyd. 2-gie, zmienione. Oprac. przez Polski Komitet Elektrotechniczny. Nakład Stow. Elektr. Polskich. Warszawa 1932. Cena zł. 8.

**Organizacja nowoczesnego biura.** Mgr. K. Barliński. Skł. gł. Inst. Nauk. Organizacji. Str. 240. Cena zł. 5:70 (opr. 7.—).

**Słownictwo elektrotechniczne polskie z odpowiednikami w jęz. francuskim i niemieckim,** oprac. przez Centralną Komisję Słownictwa Elektrotechnicznego. Zesz. 1 (pojęcia podstawowe i ogólne; maszyny i transformatory). Nakład Stow. Elektr. Polskich. Warszawa 1932. Cena arkusza w pren. zł. 1.25, osobno zł. 1.50. Cena zesz. 1 — zł. 3.

**Der Grundbau, ein Handbuch für Studium und Praxis.** Prof. Ing. Dr. techn. A. Schoklitsch. Str. 490 (40) z 748 rys. Wyd. J. Springer. Wiedeń 1932. Cena zł. 136.

**Technische Vollendung und höchste Wirtschaftlichkeit im Fabrikbetrieb.** Prof. Dr. G. Schlesinger. Str. 106, rys. 80. J. Springer. Berlin 1932. Cena zł. 11.

**National Physical Laboratory. Report for the year 1931.** Str. 301, rys. 51. Wyd. H. M. Stationary Office. Londyn 1932.

<sup>\*)</sup> Wszystkie podawane w tym dziale wydawnictwa są do nabycia w Księgarni Technicznej „Przeglądu Technicznego”. Warszawa, ul. Czackiego 3.