

POSTĘPY W BUDOWIE I ZASTOSOWANIU TURBIN WODNYCH.

Prof. St. Zwierzchowski

Odczyt, wygłoszony w Kole Warsz. Stowarzyszenia Elektr. Polskich.

W tym krótkim czasie, jaki mam do dyspozycji, nie mogę niestety omówić tych wszystkich spraw, któreby Panom jako konstruktor turbin wodnych przedstawić pragnął. Ograniczyć się muszę do najważniejszych tylko rzeczy.

W ostatnich dwudziestu latach zrobiono w budowie i zastosowaniu turbin wodnych ogromne postępy. Najważniejszymi zdobyczami z punktu widzenia konstrukcji są:

- 1) powiększenie mocy poszczególnych jednostek,
- 2) powiększenie szybkobieżności,
- 3) powiększenie sprawności.

Z punktu widzenia zaś zastosowania najważniejszym postęпом lat ostatnich jest zrozumienie, iż każda turbina wodna, a raczej każdy wirnik turbiny wodnej ma, że się tak wyrażę, swoją indywidualność, którą brać trzeba pod uwagę skrupulatnie, jeżeli się chce osiągnąć jaknajlepsze wyzyskanie danej siły wodnej we wszystkich warunkach pracy. Do czterech spraw chcę ograniczyć odczyt dzisiejszy.

1. POWIĘKSZENIE MOCY POSZCZEGÓLNYCH JEDNOSTEK.

Kiedy w roku 1906 w firmie Allis Chalmers Co w Milwaukee budowano turbinę Francisa o osi pionowej na 1300 K M przy spadku 380 stóp (116 m), a jednocześnie drugą turbinę Francisa o osi poziomej na 9 700 K M przy spadku 550 stóp (168 m), konstruktorzy na obu półkulach śledzili te prace z wielkiem zaciekawieniem, graniczącym z nieufnością, i czekali na wyniki. Imponowała wówczas wszystkim moc turbiny pierwszej a wysokość spadku (jak na turbiny Francisa) drugiej.

Obie turbiny zbudowano w roku 1907. Są one do dnia dzisiejszego w ruchu — próba zatem się udała. Rys. 1 do 6 przedstawiają te dwie turbiny. Od tego czasu ani wysokość spadku ani wielkość mocy na jednym kole nie przerażały już konstruktorów turbin wodnych, tak że ta sama firma już w roku tym samym chciała się podjąć budowy turbiny wodnej na 30 000 K M, — lecz zawiedli wówczas elektrotechnicy, którzy nie chcieli podjąć się zbudowania prądnicy dla tej turbiny.

W latach następnych budowano turbiny coraz to większe nie tylko na spadki wysokie i średnie, ale także na spadki niskie. Niedawno instalowano turbinę, napędzaną wodą Niagary, na moc 75 000 K M (patrz rys. 7, 8 i 9), a obecnie

mówi się o zbudowaniu dla Rosji turbin po 100 000 K M. Stwierdzić więc możemy, że w obecnej chwili, o ile warunki hydrauliczne na to pozwolą, konstruktorzy turbin wodnych podejmą się zbudować turbinę na największą moc, na jakąby elektrotechnicy podjęli się zbudować prądnice.

Że wymiary tych turbin olbrzymich zależą od wysokości wyzyskanego spadku, rozumie się samo przez się. Przy niskich spadkach dochodziło się niejednokrotnie do tak wielkich wymiarów, że nawet wirniki trzeba było ze względu na transport kolejowy podzielić na części (rys. 10).

Co do ogólnej konstrukcji tych turbin olbrzymich, to stosuje się obecnie tylko układ o osi pionowej z doprowadzeniem wody przez spiralę betonową lub zabetonowaną a odprowadzeniem wody rurą ssącą, zazwyczaj betonową zwykłej konstrukcji z zagięciem w stronę kanału odprowadzającego lub też bez tego zagięcia, przyczem jednak powiększa się efektywną długość rury przez dodanie szerokiego dna prostego lub stożkowato wypukłego.

Przy spadkach bardzo wysokich stosuje się, jak dawniej, koła Peltona, które także dochodzą do wymiarów bardzo wielkich, jak to widać z rys. 11, 12 i 13, przedstawiających najsilniejsze w świecie koła Peltona.

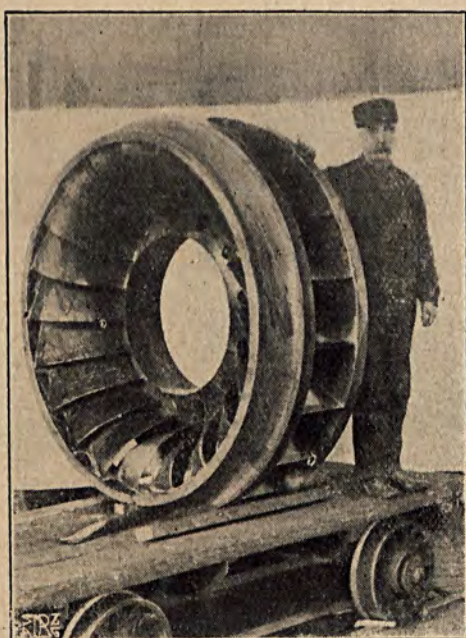
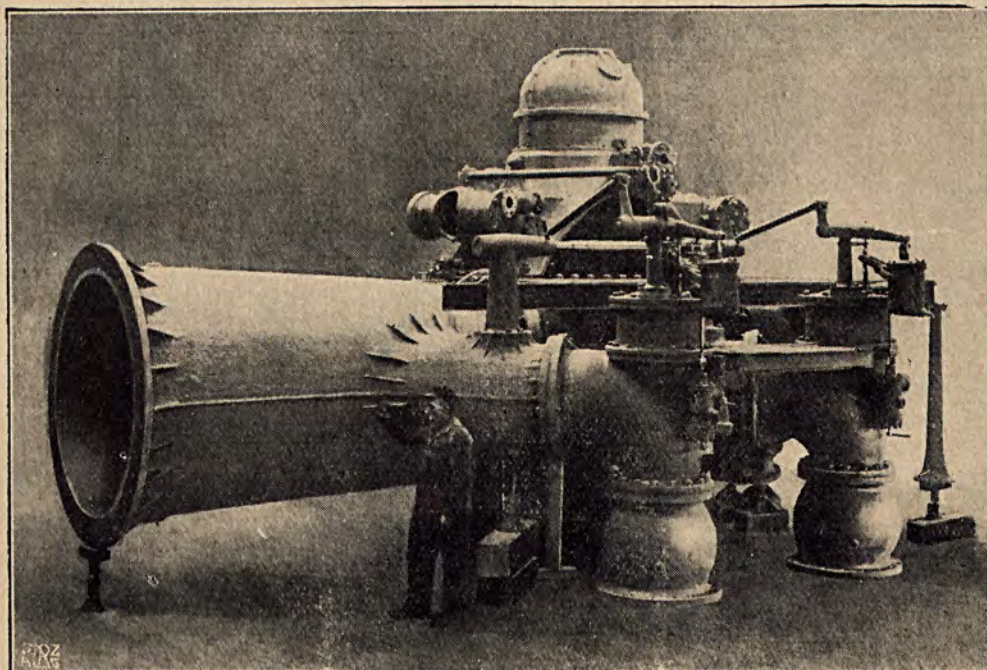
2. POWIĘKSZENIE SZYBKOBIEŻNOŚCI

Przechodząc teraz do kwestji drugiej, musimy nasamprzód wyjaśnić, co się rozumie pod „szybkobieżnością” turbin wodnych. Otóż jasne jest, że tak moc jak i ilość obrotów wirnika zależą przy danym spadku przede wszystkim od wymiarów, a zatem w pierwszej linii od średnicy wirnika, a mianowicie: przez powiększenie średnicy otrzymuje się powiększenie mocy a zmniejszenie ilości obrotów.

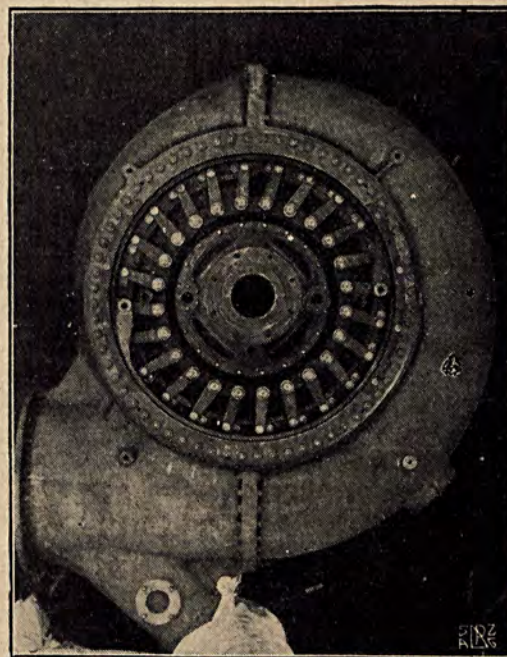
Oczywista, że konstruktor ma możność zmieniania tak mocy jak prędkości wirnika o danej już średnicy, lecz czynić to może tylko w pewnych granicach. Dla tego równoczesne powiększanie mocy i prędkości przy danym spadku, — a takie właśnie zadanie miał konstruktor turbin wodnych do rozwiązania dzięki ogólnemu rozwojowi techniki, wymagającemu coraz to silniejszych i coraz to szybszych silników, — przedstawiało bardzo wielkie trudności. I właściwie rozwiązywanie tego zadania było bodajże najważniejszym rysem historycznym rozwoju konstrukcji turbin wodnych w ostatnich dwudziestu latach.

Z wyżej wymienionej zależności między mocą i ilością obrotów wirnika a jego średnicą (przy danym spadku) wyprowadzić można pewien wyraz, który jest miarą postępu, zrobionego w kierunku

Z wzoru powyższego widzimy, że, jeżeli spadkowi damy wartość = 1 m a mocy wartość = 1 KM, to n_s będzie identyczne z ilością obrotów n . A zatem wyraz ten daje, lub symbol n_s jest „tą



Rys. 1. 2. 3.
Turbina na 1300 KM,
spadek 380 stóp. ilość
obrotów 375. Zbudo-
wana w styczniu 1907 r.
przez Allis Chalmer Co
w Milwaukee.



równoczesnego powiększania obu. Wyraz ten, znany dość ogólnie, brzmi:

$$n_s = \frac{n \sqrt{HP}}{H \sqrt{H}} = n_1 \sqrt{HP_1}$$

gdzie n jest ilością obrotów danego wirnika, HP jest mocą, a H spadkiem, pod którym pracuje, lub gdzie

$n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}$ jest ilością obrotów, zredukowaną do

spadku $H = 1m$, a $HP_1 = \frac{HP}{H \sqrt{H}}$ jest zredukowaną tak samo mocą.

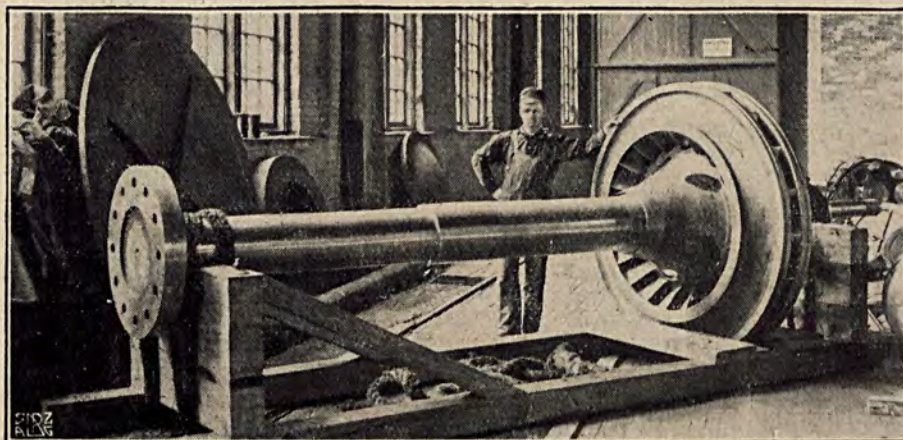
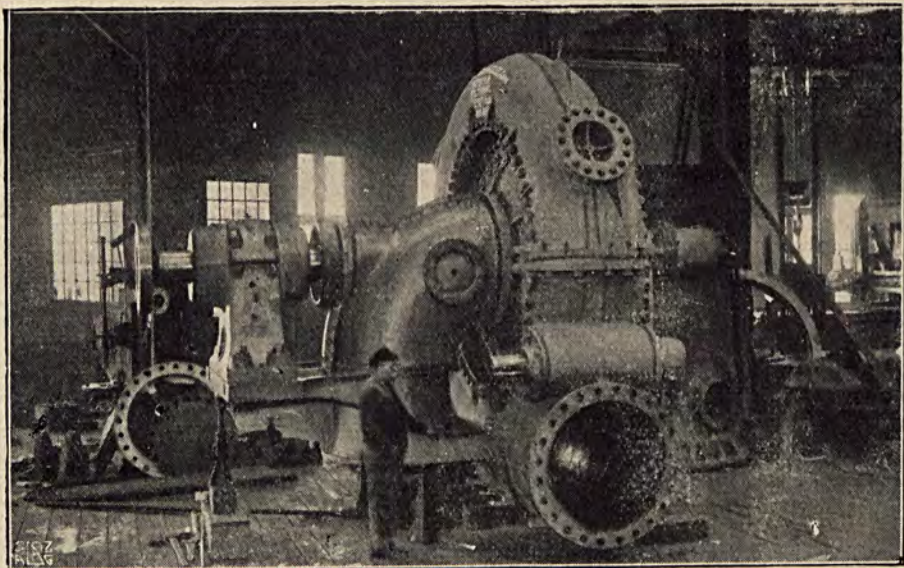
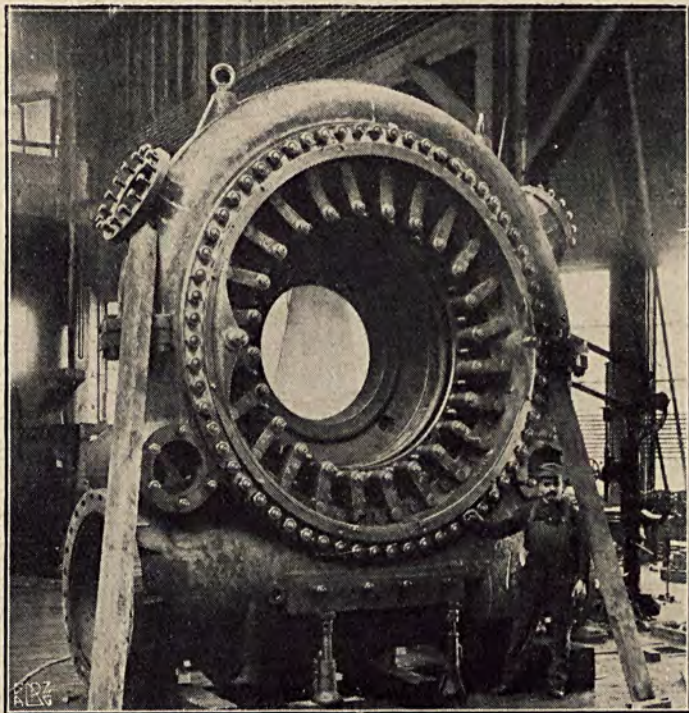
ilością obrotów, jaką dany silnik będzie miał przy spadku 1 m, jeżeli wymiary jego (zachowując oczywiście wszystkie jego proporcje bez zmiany) zmienimy do takich, że moc jego będzie przy spadku = 1 m równą jednemu KM".

Z definicji tej wynika, że n_s jest istotnie miarą „szybkobieżności” wirników turbin wodnych — powiększanie więc szybkobieżności jest powiększaniem wartości n_s . Jak już wspomniałem, przy powiększaniu szybkobieżności dochodzimy wkrótce do takich warunków, a więc do takich wartości n_s , że zadanie konstruktora staje się bardzo trudne,

a w końcu wogóle niemożliwe do rozwiązania. Wskutek pewnych ogólnie przyjętych, a jak się okazało, zupełnie fałszywych i konstruktora niepotrzebnie krępujących założeń ustalono swego czasu, że maksimum dla n_s , jakie osiągnąć można bez zbyt wielkich strat na sprawności, wynosi około 350, i przez cały szereg lat wartości tej wogóle nie starano się przekraczać. Dawano nawet teoretyczne dowody na to, że sprawność turbiny wodnej musi być mniejsza, kiedy n_s jest większe, a przy wartościach około 350 dochodzi już do tak niskich wartości, że dalsze jej obniżanie byłoby niedopuszczalne. Taki stan rzeczy i takie ogólne przekonanie istniało w kołach specjalistów aż do roku 1909, kiedy to w Ameryce te zapatrywania obalono i rozpoczął się nowy okres w budowie turbin wodnych szybkoobrotowych. Okres ten swego czasu dokładnie opisałem w odczycie, wygłoszonym w tej samej sali przed Kołem Mechaników. Dość że w roku tym podniesiono n_s do 390, a w roku 1913 do 460 w wirnikach, które jeszcze można uważać za wirniki typu Francis'a (rys. 14). Następnie przechodząc coraz to więcej do silników osiowych — przy zachowaniu jednak zasilania dośrodkowego, jak w turbinach Francis'a — doszło się do $n_s = 800$, a nawet wyjątkowo do $n_s = 1000$.

Rys. 15 przedstawia ewolucję budowy silników turbin wodnych z punktu widzenia szybkoobrotowości.

Ażeby sobie lepiej uświadomić, co postępek zrobiony w tym kierunku w praktyce znaczy, wystarczy powiedzieć, że do roku 1909 uważano, iż na przykład na spadek 4 m nie można było przy ilości obrotów 200 zbudować wirnika na moc większą, niż 120 KM. W roku 1913 można było budować bardzo dobre wirniki na 210 KM, — przy tej samej ilości obrotów i tym samym spadku, a obecnie mo-



Rys. 4, 5, 6.

Turbina na 9700 KM, spadek 550 stóp, ilość obrotów 400. Zbudowana w styczniu 1907 r. przez Allis Chalmer Co w Milwaukee.

zna je budować na 650 KM, — a nawet niemal że na 1000 KM.

3. POWIĘKSZENIE SPRAWNOŚCI.

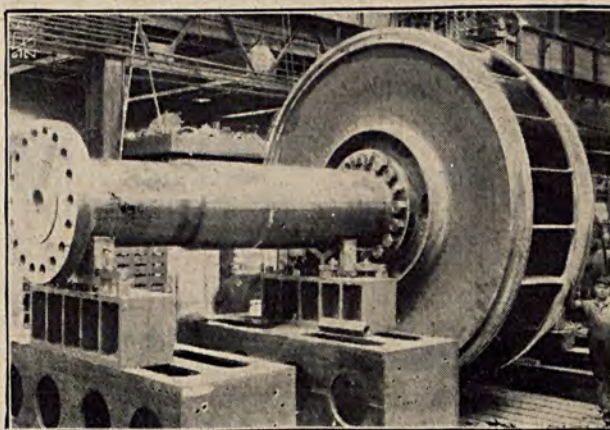
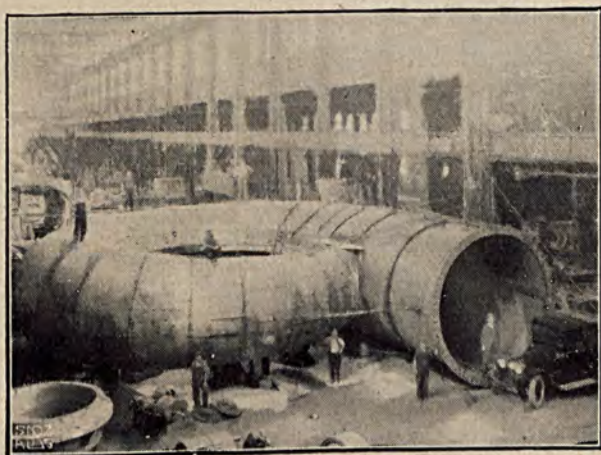
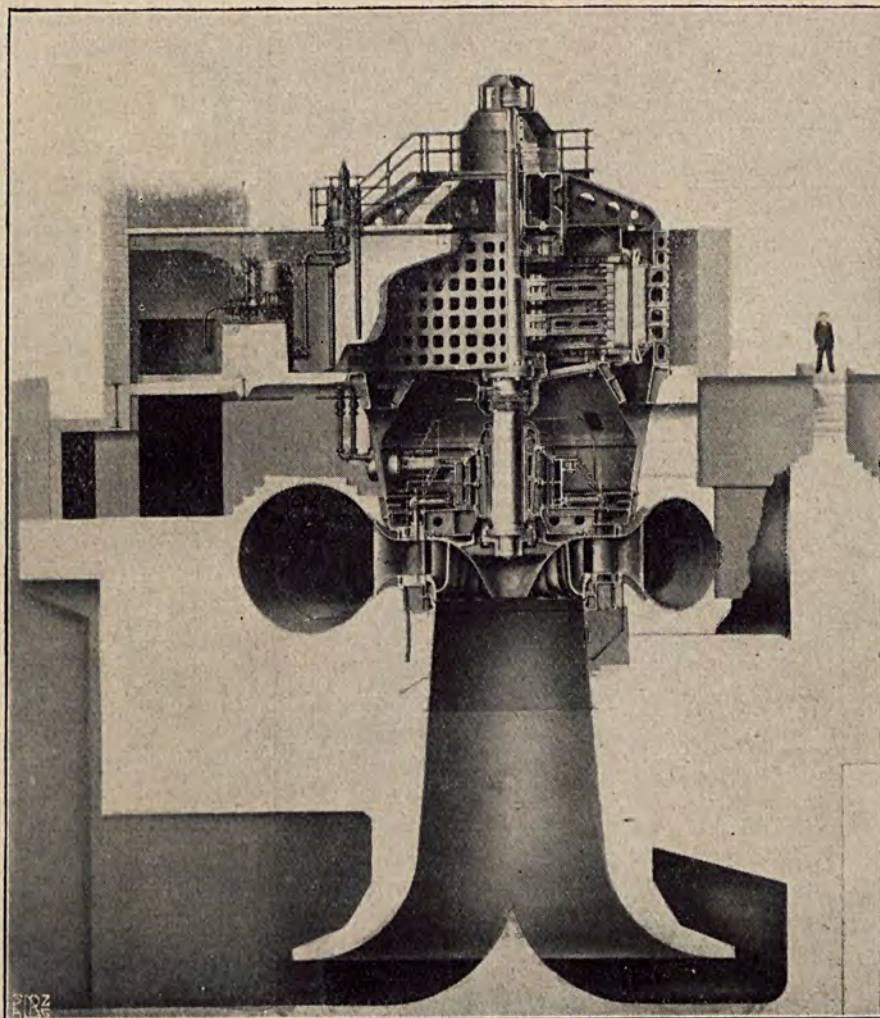
Przechodząc teraz do punktu trzeciego, zaznaczyć muszę na samym początku, że postępy, osiągnięte

wie wirników na coraz to większe n_s , otrzymywano coraz to lepsze sprawności. Dawniej sprawność 80 — 82%, a najwyżej 84% była uważana za bardzo dobrą i zupełnie zadowalniającą, — tymczasem w roku 1909 budowano w Ameryce wirniki o średniej wielkości na 80% sprawności przy $n_s = 390$ a w roku 1913 na 91% przy $n_s = 460$. Turbiny o większych wymiarach dochodziły i dziś dochodzą do 94% sprawności.

Pierwsze wiadomości o tych wielkich sprawnościach powitano w Europie, a szczególnie w Niemczech z niewiarą — i znowu dowodowano „teoretycznie”, że są one zupełnie niemożliwe. Lecz dowody te wciąż jeszcze opierały się na owych błędnych i krępujących założeniach konstruktora i wskazaniach starych, które tak długo powstrzymywały postęp w kierunku n_s . Obecnie i Europa buduje turbiny wodne o tak wysokich sprawnościach i nikt ich nie kwestionuje.

4. RACJONALNE ZASTOSOWANIE

Jak wiadomo, każda maszyna reaguje w sposób dla niej charakterystyczny na warunki, w jakich ma pracować. Szczególnie jaskrawo reagują na nie maszyny wirnikowe. Każda pompa odśrodkowa n. p. ma tak wybitną indywidualność, że niejednokrotnie, kiedy pracować ma w innych, niż normalne, warunkach, sprawia takie niespodzianki,



Rys. 7, 8 i 9. Turbiny dla Niagary. HP = 70 000, $n = 107$, H=213 stóp. Waga wirujących części przeszło 32 tony.

nięte co do sprawności, szły w parze z postęпами co do szybkobieżności. Okazało się bowiem, że te same teorie a raczej mniemania, które ustalały dla n_s maksymalną wartość około 350, były błędne także odnośnie do sprawności, bo właśnie przy budo-

iz wielu inżynierów do dziś unika instalowania pomp odśrodkowych mimo ich ogólnych zalet.

Wprawdzie turbiny wodne takich niespodzianek jak pompy odśrodkowe, które niejednokrotnie wprost przestają pompować, nie sprawiają, bo zaw-

sze się przy tych zmiennych warunkach, jakie w praktyce zachodzą, obracać będą i pewną moc dadzą. Mimo to jednak każdy wirnik turbiny wodnej ma swą wybitną indywidualność, którą wziąć trzeba pod uwagę, jeżeli się chce, aby dana siła wodna była jaknajlepiej wykorzystana w całości t. j., aby średnia sprawność zakładu była jaknajlepsza. Rys. 16 jest przykładem jednego z wirników, budowanych w Ameryce. Jest to topograficzny rysunek pagórków sprawności, pozwalający określić sprawność danego wirnika przy dowolnym spadku. W tem bowiem, że krzywe sprawności narysowane są w zależności od zredukowanej

liczby obrotów $n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}$ i od zredukowanej mocy $HP_1 = \frac{HP}{H/\sqrt{H}}$, kryje się i zależność od spadku.

Weźmy dla przykładu wirnik 16. Niech spadek, pod którym pracuje normalnie, będzie 9 m, a ilość obrotów 300; zredukowana ilość obrotów będzie $\frac{300}{\sqrt{9}} = 100$. Gdybyśmy na linii $n_1 = 100$ przecięli pagórek sprawności, otrzymalibyśmy krzywą sprawności w zależności od zredukowanej mocy przy stałym spadku normalnym 9 m. Widzimy, n. p., że najlepsza sprawność 90% zachodziłaby przy $HP_1 = 20.6$ lub przy rzeczywistej mocy $HP = 20.6 \times 9 \sqrt{9} = 556 \text{ K M}$, a maksymalna moc wynosiłaby:

$$HP = 21.8 \times 9 \sqrt{9} = 588.$$

Widzimy również, że przy mocy

$HP = 14 \times 9 \sqrt{9} = 378$, czyli przy obciążeniu 64% otrzymalibyśmy jeszcze 80% sprawności.

Wystawmy sobie teraz, że wirnik ma pracować także pod spadkiem 6.5 m (w sezonie wód wysokich), — naturalnie przy tej samej ilości obrotów. Znaczyłoby to, że zredukowa-

na ilość obrotów wynosiłaby teraz $\frac{300}{\sqrt{6.5}} = 117.7$ i że musielibyśmy na tej linii przeciąć pagórek sprawności, aby odczytać sprawność dla każdego obciążenia zredukowanego, a mnożąc je przez $6.5 \sqrt{6.5}$, dla każdego obciążenia rzeczywistego, widzimy n. p., że obecnie najlepsza sprawność wynosiłaby 84%, i to przy obciążeniu $HP = 21.25 \times 6.5 \sqrt{6.5} = 356 \text{ K M}$, a największa moc, jakąbyśmy z wirnika tego wydobyli, wynosiłaby $22 \times 6.5 \sqrt{6.5} = 365 \text{ K M}$.

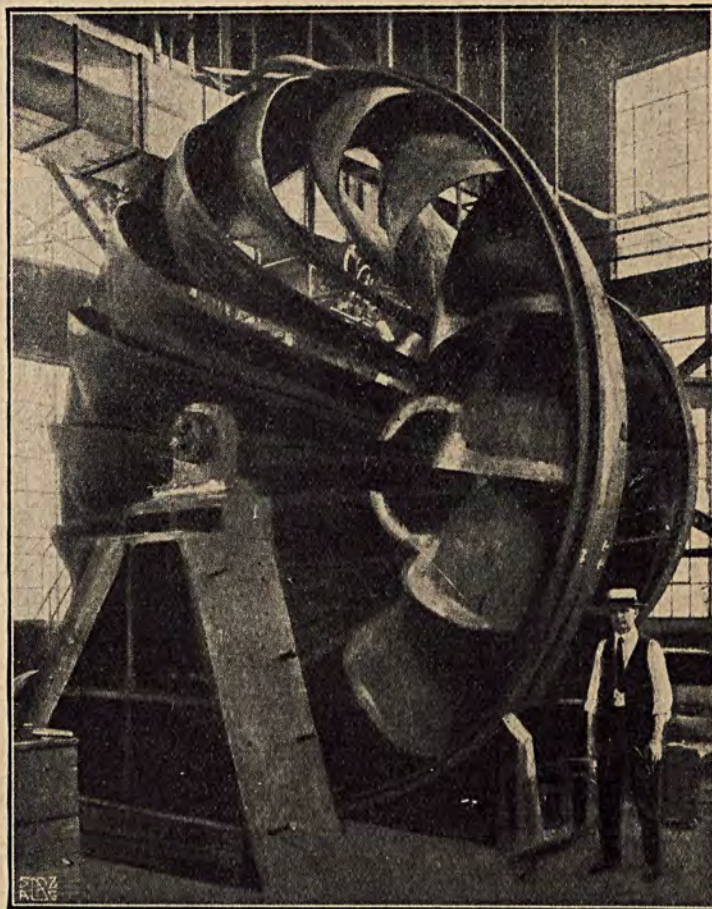
Przypuśćmy dalej, że idzie w tym wypadku o stację, która ma przez cały rok, a zatem i w sezonie wysokich wód mieć co najmniej 2000 K M. Znaczyłoby to, że musielibyśmy instalować co najmniej 6 silników i mieć je wszystkie w ruchu w sezonie wód wysokich.

Gdybyśmy jednak powiększyli średnicę wirnika z 690 mm (taką bowiem średnicę ma wirnik dotąd rozpatrywany) na 730 mm, okazałoby się, że 5 silników wystarczyłoby, — naturalnie kosztem sprawności.

Wirnik 730 mm powinien bowiem mieć zredukowaną ilość obrotów $\frac{690}{730} \times 100 = 94.6$, jeżeliby

miał tak, jak poprzedni, dać najlepszą sprawność przy normalnym spadku $H = 9 \text{ m}$. Tymczasem, jeżeli ma on mieć tę samą ilość obrotów, co poprzedni, znaczy to, że musimy go przyspieszyć w sto-

sunku $\frac{730}{690} = 1.058$, a zatem przy $H = 9 \text{ m}$ warunki



Rys. 10. Wirnik turbiny — podzielnny. Moc 10 800 K M, spadek 30 stóp, ilość obrotów 55.6. Zbudowany przez I. P. Morris w Philadelphiji.

pracy wirnika 730 mm odpowiadałyby tym, którebyśmy w wirniku 690 mm otrzymali, przecinając pagórek sprawności na linii 105.8. Mielibyśmy więc sprawność najlepszą nieco poniżej 90% (poprzednio mieliśmy 90.7%). Przy $H = 6.5 \text{ m}$ zaś warunki odpowiadałyby tym, które otrzymalibyśmy, prze-

cinając pagórek sprawności na linii $117.7 \times \frac{730}{690} = 124.5$.

Najlepsza sprawność w tym wypadku wynosiłaby nieco ponad 80% (poprzednio mieliśmy 84%), a maksymalna moc wirnika wynosiłaby, ponieważ moc zmienia się z średnicą jak średnica, wzięta do kwa-

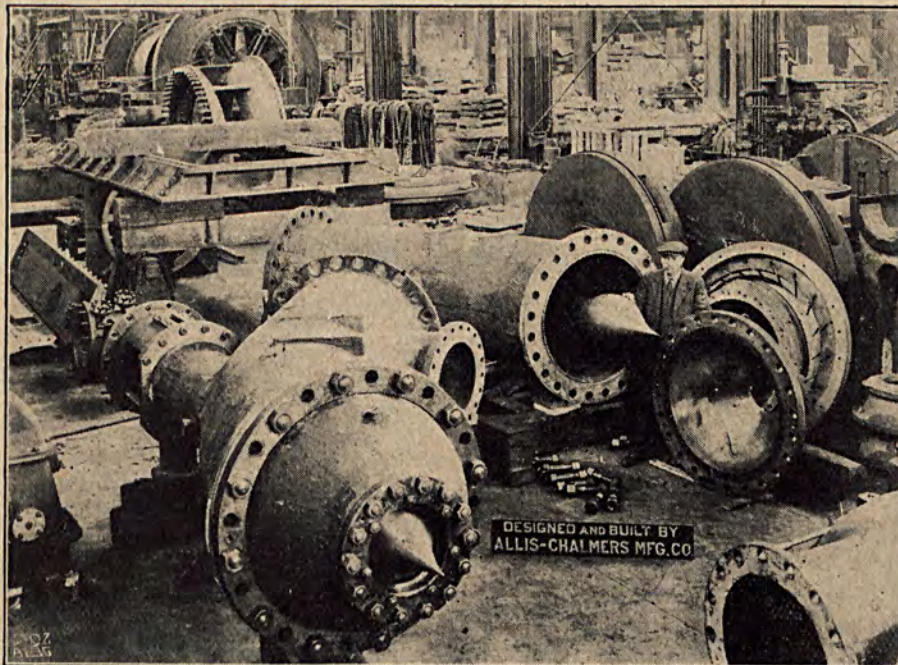
dratu, $HP_{\max} = 22 \times \left(\frac{730}{690}\right)^2 \times 6.5 \sqrt{6.5} = 408$.

A zatem, jak zaznaczaliśmy, pięć wirników wystarczyłoby zamiast sześciu.

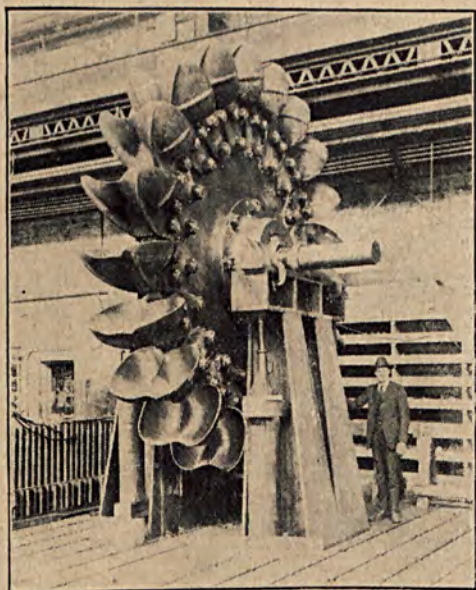
Ten jeden przykład niech wystarczy, aby wykazać, jak istotnie ważnym jest przy instalowaniu turbin wodnych kierować się nie tylko tem, że ten lub ów wirnik ma taką a taką sprawność najlepszą, lub może kosztuje tyle a tyle, ale także tem, jaką posiada ogólną charakterystykę, wyrażającą się w kształcie pagórka sprawności. Nie wszystkie wir-

ka sprawności bardzo często będzie wskazane „pospekulować”, że się tak wyrażę, nieco na średnicy wirnika, t. j. instalować celowo wirnik albo większy albo mniejszy od tego, jakiby odpowiadał normalnemu spadkowi.

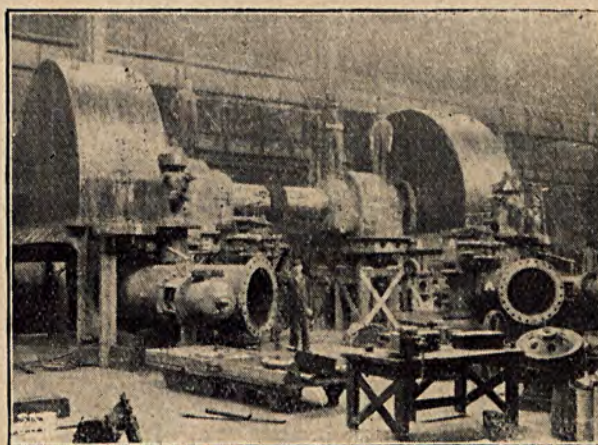
I za wielki postęp w praktyce lat ostatnich uważać musimy właśnie to, że obecnie bierze się te



Rys. 11.



Rys. 12.

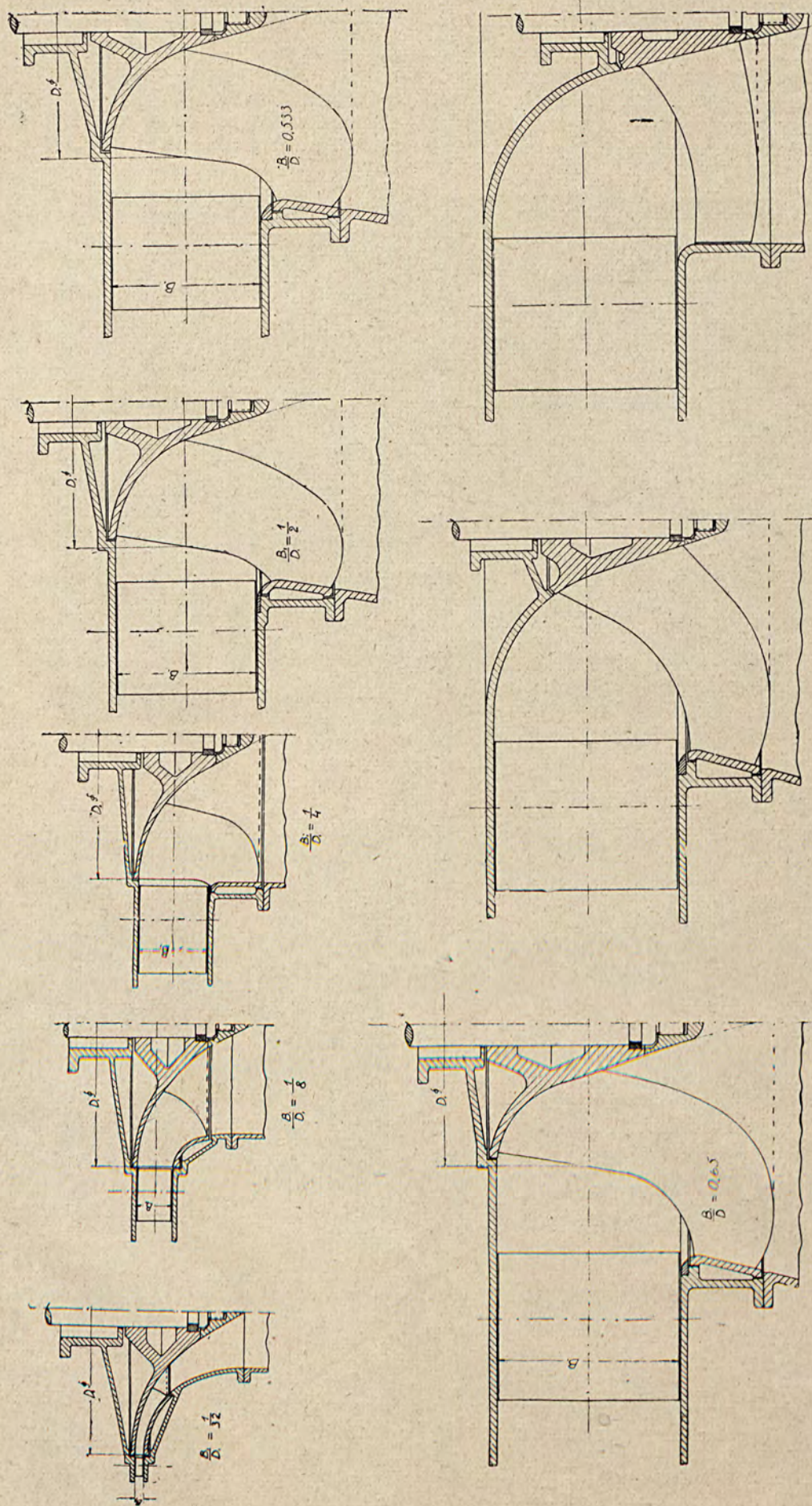


Rys. 13

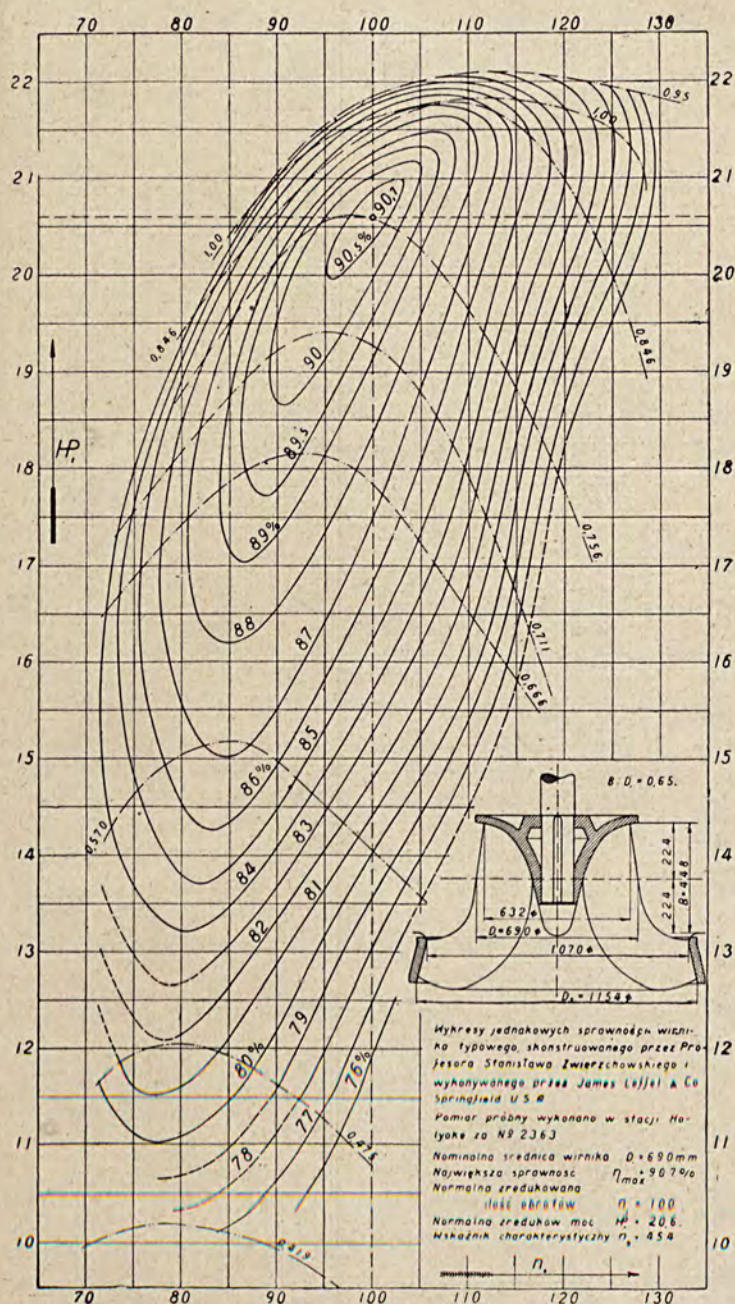
Rys. 11, 12, 13. Turbina z dwoma kołami Peltona. Moc 30 000 HP, spadek 1008 stóp, ilość obrotów 171. Najsilniejsze koło Peltona.

niki dadzą równie dobre rezultaty, choćby miały tę samą sprawność, moc i ilość obrotów przy spadku normalnym. Z przytoczonego przykładu wynika, że nie zawsze będzie wskazane instalować turbinę, dającą najlepszą sprawność przy normalnym spadku i normalnym obciążeniu. Zależnie od danych hydraulicznych, siły wodnej i kształtu pagór-

sprawy skrupulatnie pod uwagę. Dlatego też, aczkolwiek powiedzieć można, że turbiny na średnie i wielkie moce buduje się zawsze ad hoc, to jednak co do wirników praktykuje się, że używa się tylko typów znormalizowanych i wypróbowanych, bo teoretycznie określić charakterystyk wirników nikt nie jest w stanie.



Rys. 15. Ewolucja typów wirników z punktu widzenia szybkoobrotowości.



Rys 16.

Szczególnie w dobie obecnej, kiedy dochodzi się do tak ekonomicznego wyzyskania energii cieplnej w silnikach parowych, wiele sił wodnych okazuje się rentownymi dopiero po dokładnym doborze wirnika i co do typu i co do średnicy — a niejednokrotnie dopiero po bardzo dokładnym opracowaniu planu pracy elektrowni wodnej i na wszystkie możliwe kombinacje obciążenia i spadku, jakie zachodzić mogą.

To też, kiedy idzie o elektrownie wodne na bardzo wielkie moce, odbiorca coraz częściej nie zadawania się tem, że firma projektująca turbiny ma już wypróbowane typy wirników i na zasadzie znanych dla nich krzywych charakterystycznych daje ściśle gwarancje, lecz zamawia osobną turbinę próbną, w zupełności podobną do tej, jaką się ma instalować w rzeczywistości, i każe ją poddać ściśłym badaniom w laboratorium, przy ewentualnem zastosowaniu różnych modyfikacji w budowie wirnika, ewentualnie także rury ssącej i spirali doprowadzającej, aby się upewnić co do charakterystyk turbin, jakie mają być instalowane. Po ich zainstalowaniu zaś robi się na miejscu jaknajdokładniejsze pomiary, aby na zasadzie aktualnych charakterystyk opracować ostateczny plan pracy stacji na wszelkie kombinacje mocy, spadku i ilości wody, jakie zachodzić mogą.

Ma to szczególne znaczenie we wszystkich wypadkach, gdzie siła wodna jest bardzo zmienna co do wysokości spadku i ilości wody, a zakład wodny jest tylko jedną z siłowni, — obok siłowni cieplikowych, — zasilających większą sieć okręgową w prąd.