

Summaryzna produkcja tych nowych zakładów wyniesie około 600 milionów kWh rocznie, co odpowiada normalnemu przyrostowi zapotrzebowania w dwu do trzyletnim czasokresie.

Wzrost zapotrzebowania prądu elektrycznego w Szwecji nie ustaje, a to przeważnie z powodu elektryfikacji kolei żelaznych. Dotychczas zelektryfikowano linię Stockholm - Malmö i szereg odcinków nadbrzeżnej kolei zachodniej. W projekcie jest elektryfikacja głównej kolei północnej Stockholm — Gällivare (miejsowości, leżącej poza północnym równoleżnikiem polarnym) o długości, przekraczającej 1.000 km. Energii dla tej elektryfikacji dostarczają elektrownie rządowe, publiczne oraz prywatne (głównie Krängede Kraft AG i Sydvenska Kraft AG).

Inż. Holm kończy swoje sprawozdanie następującym zdaniem: „Ponieważ współpraca państwa z prywatnymi przedsiębiorstwami okazała się nadzwyczaj ważną i pożyteczną w dziedzinie dostarczania energii elektrycznej dla celów gospodarczych w kraju — będzie ona w dalszym ciągu kontynuowana”.

Sprawozdanie powyższe nasuwa kilka refleksyj technicznych, gospodarczych i socjalnych, mianowicie:

Szwecja należy do krajów o stosunkowo małych bogactwach naturalnych, o klimacie niegościinnym. Głównym bogactwem przyrodzonym są tu rudy i niewiele drzewa. złóż węglowych posiada Szwecja niewiele, a węgla z tych złóż nie można zaliczyć do pierwszorzędných. Rzeki Szwecji, kraju o kształcie podłużnym i średniej szerokości około 250 do 300 km, płyną przeważnie z zachodniego granicznego łańcucha górskiego w kierunku Bałtyku, a więc w kierunku poprzecznym kraju, są zatem krótkie, o wąskich (pod względem wielkości powierzchni niewielkich) dorzeczych, a objętości wody — płynące w ich przeważnie granitowych łożyskach — nieznaczne. Największa rzeka Szwecji Gäta-älven jest odpływem największego szwedzkiego jeziora Ve-

ner — jej średni roczny odpływ wynosi 560 m³/s, a największa woda nie przekracza 1.000 m³/s. Dlatego też siłownie wodne nie rozporządzają większym zapasem mocy. Są to siłownie małe o mocy od 10.000 KW do 40.000 KW. Największa z nich, pracująca odpływem jeziora Vener, należy co do wielkości mocy do średnich, jest to siłownia Trollhätan, wytworząca moc 127.000 KW. Do charakterystycznych cech przyrody kraju należą liczne jeziora, które są naturalnymi zbiornikami wody, ułatwiającymi w wysokim stopniu wyzyskanie sił wodnych. Głównym przemysłem szwedzkim jest przemysł drzewny i papierniczy, wreszcie ciężki przemysł metalurgiczny w okręgu III-cim, zasilany przemysłem górniczym. Głównymi produktami wywozu są wytwory przemysłu drzewnego, papierniczego i rud metalowych, a ostatnio wywozi Szwecja także i prąd elektryczny. Wspomnieć tu także należy o połowie ryb, którym trudnią się mieszkańcy, osiedleni na wyspach i brzegach Bałtyku.

Jeżeli się zważy znaczną sumę energii, jaką przeciętny mieszkaniec Szwecji, wskutek północnego położenia geograficznego kraju musi wyładować celem zdobycia ogrzania (opał i odzież) i oświetlenia (dnie półrocza zimowego od 21.IX do 21.III są bardzo krótkie, a w północnej części kraju, poza równoleżnikiem polarnym, panuje w tym czasie nieprzerwana noc) w stosunku do krajów bardziej na południe położonych, a tem samym cieplejszych i w zimie jaśniejszych, oraz jeżeli się zważy, że produkcja środków żywności, a szczególnie zboża i owoców w Szwecji jest dla własnych potrzeb kraju niewystarczającą — to należy podziwiać dobrobyt i wysoką stopę życiową przeciętnego mieszkańca Szwecji.

Przyczyną tego jest nie tylko zapobiegliwość i mrówcza praca, lecz zdaje się w pierwszym rzędzie współpraca jednostek prawnych, a więc Państwa, z fizycznymi, o której inż. Holm wspominał w swoim sprawozdaniu.

Inż. Dr. Kazimierz Wóycicki

Zjawisko kawitacji i jego wpływ niszczący na urządzenia w budowlach wodnych

Pierwsze obserwacje nad zjawiskiem kawitacji i wywołanej przez nią korozji materiałów budowlanych sięgają roku 1894. Zjawisko zaobserwowano początkowo na śrubach okrętów wojennych (kontrtorpedowców), zauważając bardzo wydatne zmniejszenie się współczynnika sprawności i typowy zewnętrzny wygląd korozji. W roku 1899 obserwowano podobne zjawisko w turbinie zakładu wodnego *Jalce* w Bośni. Gdy od tego czasu prędkości okrętów ciągle rosły, a turbiny wodne i pompy zaczęto budować na większe spadły i przy zwiększonych ilościach obrotów, kawitacja stała się zjawiskiem częstszym. Obecnie stanowi jedno z poważnych zagadnień, nie tylko przy projektowaniu pomp, turbin i zakładów wodnych, ale i w szeregu innych urządzeń wodnych, gdzie objawiając się powoduje niepożądaną stratę współczynnika sprawności, oraz niszczenie materiału konstrukcji.

Co to jest kawitacja wskazuje sama nazwa. Jeśli w jakiejś cieczy tworzą się miejscowe próżnie, wypę-

nione powietrzem, gazem, lub parą cieczy, mamy do czynienia ze zjawiskiem kawitacji. Tworzenie się baniek próżni wywołane jest znaną właściwością wody przechodzenia w stan pary przy stosunkowo niskiej temperaturze, jeśli ciśnienie obniży się do pewnej granicy. Tworzenie się baniek kawitacyjnych nie jest niczem innym jak pewną formą wrzenia wody.

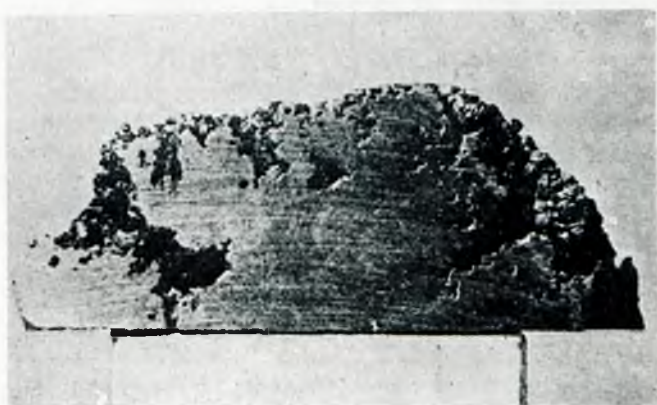
Jak się okazuje, woda czysta wytrzymuje ciągnięcie. Woda a b s o l u t n i e czysta może wytrzymać ciągnięcie w zadziwiającym stopniu. W przeprowadzanych doświadczeniach¹⁾ była woda poddawana ciągnięciu powyżej 20 atmosfer!! Jest to możliwym jedynie jeśli w wodzie niema absolutnie powietrza i ciał obcych. W praktyce inżynierskiej mamy do czynienia z przepływami wody zmieszanej z pewną ilością stałych zawiesin i zawierającą powietrze. W tym wypadku, jeśli ciśnienie w jakimś punkcie spadnie do okre-

¹⁾ Prof. W. Gaede. Karlsruhe. Technische Hochschule.

ślonej wartości, zawartość wody zostaje przerwana i zawarte w niej gazy uwalniają się. Wytwarza się serja baniek, powodując początek parowania wody. Cząstki stałe wpływają więc tu katalitycznie.

W jakich miejscach przepływu może ciśnienie spaść do wartości ciśnienia pary? Rozważania teoretyczne i doświadczenia uczą nas, że jeśli w cieczy niema wirów, miejsce najniższego ciśnienia może się wytworzyć na ograniczeniach przepływu, to jest w miejscach ścian, niezależnie od tego czy są one nieruchome, czy też w ruchu. W wypadkach istnienia wirów, najniższe ciśnienie powstaje w ich centrum.

Jeżeli więc w jakimkolwiek punkcie bezwzględne ciśnienie zbliża się do ciśnienia pary wodnej, powietrze i gazy oswobodzają się z wody i pierwszym objawem jest tworzenie się niewielkich baniek (bąbli). Objętość tych baniek zwiększa się przez parę wodną, gdy zostanie osiągnięte jej ciśnienie. Na skutek istnienia przepływu baniki te zostają pociągnięte w dół prądu i gdy wejdą w strefę większego ciśnienia, dostateczne by je zdusić, giną w ten sposób, że para cieczy, wobec łatwej odwracalności procesu waporyzacji i kondensacji, podlega nagłej kondensacji. Absorbacja powietrza



Ryc. 1.

przez wodę nie może się odbyć w tak szybkim stopniu. Powierzchnia bańki próżniowej jest bardzo mała, tak że w tym nieskończenie krótkim przeciągu czasu gazy nie mogą być wchłonięte przez wodę i wobec tego bańka powietrzna jest gwałtownie ściśnięta (skomprimowana) w czasie nieskończenie krótkim w formie uderzenia. Wywołuje to w miejscu znikania baniek próżni nieprawdopodobnie wysokie ciśnienie, rozprzestrzeniające się na odległość równą długości 2 — 3 baniek. Okazuje się, że może ono sięgać około tysiąca i więcej atmosfer. Jeśli jeszcze w dodatku taka skomprimowana bańka powietrzna dostanie się do młogo otworu lub szparki w materiale, stanowiącym płaszczyznę ograniczającą przepływ, to działa jak materiał wybuchowy, a więc w wysokim stopniu niszcząco. Efekt jest bardzo groźny i to jest główna przyczyna szybkiego niszczenia materiału. Inne wpływy fizyczne i chemiczne są bezporównania mniejszego znaczenia i mogą tylko w pewnym stopniu wzmocnić działanie niszczące, szczególnie gdy woda zawiera pewne gazy (dwutlenek węgla). Jeśli powierzchnię ograniczoną stanowi metal, niszczenie wzmożone będzie przez proces chemiczny. Jak wspomniano wyżej, przy parowaniu wody zostają oswobodzone zawarte w niej gazy, ponieważ zaś woda dość silnie pochłania tlen (woda absorbuje około 2 — 7%

powietrza), mieszanina gazów zawiera bardzo dużo tlenu, który, oswobodzony w strefie depresji, atakuje metal w warunkach dla ostatniego szczególnie niekorzystnych (wilgotnej atmosferze). Wpływ wywiera też przewodnictwo cieplne materiału i wody. Kompresja tej małej objętości powietrza względnie gazów, przy tak małej powierzchni i bardzo krótkim przeciągu czasu, jest procesem, który nie zachodzi jako zjawisko izotermiczne, wobec czego powstaje silny wzrost temperatury. To wyjaśnia ten charakterystyczny obraz zniszczonej powierzchni metalu jako stopionej lawy (rys. 1)

Zniszczenie zależy w dużej mierze od elastyczności materiału. Materiały bardziej elastyczne, jak np. bronz, są bardziej odporne niż takie, które są bardziej łupliwe, jak szkło. Materiały bardziej drobnoziarniste, więc np. beton drobnoziarnisty lepiej się konserwuje od gruboziarnistego. Z metali najmniej odporne jest żeliwo, dalej stal, najbardziej — bronz.

Z tego co powiedziano wyżej widzimy, że zjawisko kawitacji charakteryzuje się szybkimi i gwałtownymi zmianami ciśnienia w ośrodku wody, wywołując powstawanie częstych fal, rozprzestrzeniających się z prędkością, zbliżoną do szybkości dźwięku w wodzie. Fale te wywołują, na powierzchniach ograniczających, zmiany ciśnienia, sięgające wartości tysiąca i więcej atmosfer. Jeśli powierzchnie posiadają nierówności, zmiany ciśnienia potęgują się.

Dla zorientowania się jakie wartości może osiągać ciśnienie w wypadku otworu w ścianie warto rozważyć następujący przykład: Otwór ma głębokość 1 cm i 1 cm² przekroju, ze względu na chwilowo wywołane obniżenie zewnętrznego ciśnienia wody, wytworzyła się u spodu otworu przestrzeń wysokości 1 mm, wypełniona parą. Jeżeli naprzykład zewnętrzne ciśnienie wody podniesie się o 1 atmosferę, to łatwo można obliczyć, że fala wody wpadnie na ścianę dolną otworu z prędkością 4,51 m/sek.

Objętość wody podlega stosownie do wielkości przekroju otworu sile 1 kg wynosi 0,9 cm³. Masa tej wody wyniesie 0,0009/9,81 kg. Z zasady siła równa się masie razy przyspieszenie otrzymamy wartość przyspieszenia $a = 9,81/0,0009 = 10090$ m/sek². Woda podlega przyspieszeniu na długości

$$l = 1 \text{ mm, z zależności } l = \frac{at^2}{2}, \frac{dl}{dt} = v, v = at, \text{ otrzymamy}$$

$$t = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{0,002}{10090}} = 0,000447 \text{ sek, wobec czego}$$

$$v = 0,000447 \cdot 10090 = 4,51 \text{ m/sek. Wysokość ciśnienia określi się z zależności:}$$

$$H = \frac{\text{prędkość wody} \times \text{prędkość dźwięku w wodzie}}{\text{przyspieszenie ziemskie}} = 4,51 \cdot 1400/9,81 = 642,6 \text{ m} \approx 65 \text{ atmosfer.}$$

Podstawa doświadczalna jeszcze nie jest na tyle pełna, żeby można było obecnie dać ścisłą fizyczną i matematyczną teorię zjawiska. Jest jednak pewnym, że ciśnienie i temperatura może wzrosnąć w bardzo wysokim stopniu w punkcie zgniecenia bańki próżniowej. Należy zwrócić uwagę, że to zgniecenie pojawia się nie w punkcie najniższego ciśnienia, a raczej nieco w dół.

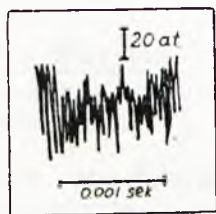
Istnieje już znaczna ilość doświadczeń, popierających wyżej wyłożone objaśnienie zjawiska. Jednym z pierwszych, którzy przeprowadzali badania nad kawitacją był Föttinger¹⁾, dowodząc, że główną rolę w niszczeniu odgrywają działania mechaniczne. Badania jego wykazały charakterystyczne korozje na

¹⁾ Föttinger. Untersuchungen über Kavitation und Korrosion. Hydr. Probl. 1926.

szkle, które na działania chemiczne roztworów soli jest wyjątkowo odporne. Stwierdził on że najbardziej atakowane są miejsca nie te, gdzie panuje najniższe ciśnienie, a więc tam, gdzie gazy wydzielają się z wody najbardziej intensywnie, a w strefie kondensacji baniek pary. Korozja materiału przypisaną być musi czysto mechanicznemu wpływowi, który powstaje z powodu bardzo szybkiej kondensacji baniek pary i objawia się w formie uderzenia wodnego. Bardzo charakterystycznym objawem, towarzyszącym zjawisku kawitacji, szczególnie w turbinach szybkoobrotowych, są silne huk i sile wystrzałów armatnich i wstrząsy maszyny.

Nad działaniem uderzenia wodnego przeprowadził doświadczenia C. Parson¹⁾. Przebił on metalowe przepony o takich wymiarach, że ciśnienie, wywołujące ich pęknięcie, wyniosło 11.000 kg/cm². Ciśnienia tego rzędu wartości objaśniają szybkie zniszczenie każdego materiału, jakkolwiek byłby on odporny. Okazuje się jednak, stosownie do doświadczeń P. Haller'a²⁾, wykonanych w laboratorium hydraulicznym Escher Wyss'a w Zurychu i w zakładzie Handeck (Oberhäsliwerke), że przy pewnych warunkach ciśnienia, niszczące materiały, nie potrzebują osiągać bardzo dużych wartości. Okazuje się, że rozdrobnienie się (rozprysnięcie) strugi wodnej w turbinach Pelton'a i uderzenie poszczególnych kropli wody wywiera bardzo silne niszczące działanie. Doświadczenia nad korozją, wywołaną przez uderzenie kropli wodnych (Tropfenschlag) wykazały, że zniszczenie mechaniczne ma charakter zupełnie ten sam jak przy kawitacji. Podobne rezultaty otrzymał T. Hengstenberg³⁾.

Dla pomiarów sił w strefie kawitacji, wobec niemożności zastosowania zwykłych manometrów z uwagi na ich dużą bezwładność, zastosowano specjalnie skonstruowany przyrząd, komórkę piezokwarewą (wyzyskane są tu piezoelektryczne właściwości kryształu kwarcu, ładowania się elektrycznością pod działaniem siły zewnętrznej). Dla zobrazowania przebiegu ciśnienia podaje na rys. 2 zmiany ciśnienia w strefie



Rys. 2

kawitacji (w doświadczeniu), zmierzone wspomnianym przyrządem. Jak widać zmiany ciśnienia następują nader szybko i zanotowane być mogą tylko dzięki zastosowaniu odpowiedniego oscylografu.

Badania, przeprowadzone w zakładzie Handeck, wykazały, że normalnie ciśnienia nie przekraczały 180 kg/cm², od czasu do czasu około 2 razy na sekundę ciśnienie sięgało wartości 250 — 300 kg/cm². Powstanie pierwszej rysy na materiale i początek erozji przy działaniu tego rzędu ciśnienia daje się trudno wyjaśnić, gdyż przy metalach koniecznymi zdawałyby się być

¹⁾ Parson. Investigations into the cause of corrosion or erosion of propellers. Engin. 1919.

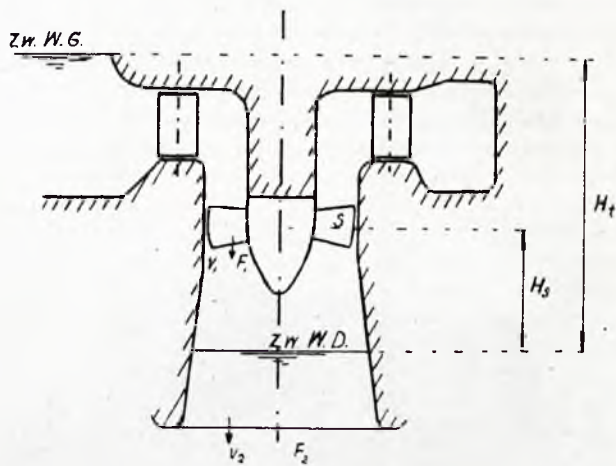
²⁾ P. de Haller. Untersuchungen über die durch Kavitation hervorgerufenen Korrosionen. Schweiz. Bauz. 1933.

³⁾ Hengstenberg. Accelerated tests reveal corrosionresisting metals. Power. 1932.

ciśnienia 2000 — 3000 kg/cm². Najprawdopodobniej więc zjawisko zniszczenia powstaje też ze względu na obniżenie wytrzymałości materiału wskutek zmęczenia.

Ze względu na to, że zjawisko kawitacji najbardziej groźnie przedstawia się w wypadku jego występowania w turbinach wodnych i że w tych wypadkach najbardziej zostało zbadane, warunek teoretyczny możliwości kawitacji rozważymy najprzód w zastosowaniu do turbiny. Podobnie zresztą i równie łatwo można go wyrazić (patrz dalej) i w innych wypadkach.

W turbinach reakcyjnych (Francis'a względnie Kaplan'a) znajduje się często miejsce, gdzie wytwarza się jeśli nie absolutna próżnia, to dostateczne obniżenie ciśnienia do wywołania kawitacji. Jest nim wejście do rury ssącej. Bardzo też często obserwuje się w tym miejscu, na spodzie łopatek turbin, względnie płaszczu rury ssącej korozję kawitacyjną.



Rys. 3

Jeśli oznaczymy (rys. 3) przez: H_a ciśnienie atmosferyczne, H_p ciśnienie pary, H_s wysokość statyczną ssania, H_t ciśnienie całkowite (całkowity spad), to $H_a - H_s$ wyrazi nam podciśnienie istniejące u spodu łopatek turbiny. Wartość H_s musi być zawsze mniejsza od H_a . Gdy turbina jest w ruchu trzeba się liczyć, że następuje zwiększenie podciśnienia. Woda, wychodząca z wirnika, posiada znaczną szybkość, która następnie u wylotu rury ssącej zmniejsza się bardzo znacznie, co właśnie pozwala na wykorzystanie wysokości ssania. Energia kinetyczna zawarta w wodzie przy wyjściu z wirnika jest prawie całkowicie zużyta na zwiększenie istniejącej depresji $H_a - H_s$. Tylko niewielki ułamek tej energii pozostaje w formie prędkości w wodzie, wychodzącej z przewodu ssącego. Jeżeli energię potencjalną w odpowiednich przekrojach oznaczymy przez: $\frac{p_1}{\gamma}$ i $\frac{p_2}{\gamma}$ to zasada zachowania energii wyrazi się przez wyrażenie:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Jeżeli przyjmiemy, że przekrój na wylocie jest na tyle duży, że wartość prędkości $v_2=0$, uzyskujemy całkowite wykorzystanie wysokości ssania. Nie uwzględniając przytem strat na opory otrzymamy:

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g}$$

wyrażenie, określające maksimum wysokości ssania

dynamicznego H_d , które, zsumowane z wysokością statyczną ssania, daje wartość istniejącego podciśnienia pod łopatkami wirnika. Uwzględniając sprawność η przewodu ssącego możemy napisać $H_d = \eta \frac{v_1^2}{2g}$

Ciśnienie $\frac{p}{\gamma}$ wyrażone w słupie wody, istniejące w punkcie S, jest równe ciśnieniu atmosferycznemu H_a pomniejszonemu o sumę wysokości ssania statycznego i dynamicznego, a więc: $\frac{p}{\gamma} = H_a - H_s - H_d$. Nie można dopuścić do tego aby w punkcie S wartość ciśnienia bezwzględnego spadła do wartości ciśnienia pary H_p . Ponieważ normalnie temperatura wody przepływowej jest dość stała i niska, można w praktyce przyjmować wartość $H_p = 0$, np. dla temperatury 10°C wysokość H_p wynosi zaledwie 0,124 m.

Uwzględniając na razie wyżej powiedziane jako warunek otrzymalibyśmy dla przykładu wysokość umieszczenia wirnika H_s 1) przy turbinie wolnobieżnej, pracującej na spadzie $H_t = 200$ m, zaprojektowanej tak, że $v_1 = 0,20 \sqrt{2gH_t} = 12,5$ m/sek, przycen. $\frac{v_1^2}{2g} = 8$ m i sprawności przewodu ssącego $\eta = 0,9$, wynoszącą $-H_s < 10 - 0,9 \cdot 8,0 < 2,8$ m; 2) przy turbinie szybkobieżnej, pracującej na spadzie $H_t = 10$ m i $v_1 = 0,6 \sqrt{2gH_t} = 8,4$ m/sek, wobec $\frac{v_1^2}{2g} = 3,6$ m i sprawności przewodu ssącego $\eta = 0,9$ $H_s = 0,9 \cdot 3,6 < 6,75$ m.

Doświadczenie uczy, że ze względu na niebezpieczeństwo kawitacji trzeba mieć zawsze pewien zapas wysokości i musi on być znacznie większy przy turbinach o dużej ilości obrotów (n_s) niż w wypadku turbin średniego i wysokiego spadu. Przy turbinach szybko-

dolnej powierzchni i w tych punktach najczęściej objawia się działanie kawitacyjne.

Dla lepszego zrozumienia przebiegu ciśnienia wewnątrz urządzenia turbinowego podaję wykres (rys. 4) ¹⁾, który wskazuje stopniową zmianę ciśnienia dla cząstki wody, przepływającej przez turbinę, stosownie do wzoru Bernoulliego $\frac{p}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2g} = const$.

Krzywa, wyobrażająca zmianę ciśnienia, wskazuje początkowo wzrost ciśnienia wzdłuż linii nachylonej pod kątem 45° , następnie zaś z uwagi na zmianę części ciśnienia w składową dynamiczną, redukuje ciśnienia stosownie do prawa Bernoulliego, odpowiednio do zmiany energii potencjalnej w kinetyczną. Przy wejściu do aparatu kierującego (łopatek kierujących) widoczny jest spadek ciśnienia wobec wzrostu prędkości, specjalnie zaznacza się to przy wejściu do wirnika. Krzywa wskazuje zmianę ciśnienia wzdłuż drogi cząstki pośrodku między łopatkami, oraz zmianę od dolnej strony łopatki (gdzie istnieją, jak już wspomniano wyżej, zupełnie inne warunki jego zmiany) aż do ujednostajnienia się jego przy wyjściu. W miejscu tem ciśnienie jest mniejsze niż ciśnienie statyczne z uwagi na składową dynamiczną, jako wynik znacznej prędkości wody w rurze ssącej. Składnik ten jest regenerowany przez działanie przewodu. Gdy więc struga przepływa w dół rury, ciśnienie nie zmienia się stosownie do linii 45° , lecz jest odchyłone w prawo stosownie do tego, w jakim stopniu wzrost przekroju przewodu powoduje zmianę energii kinetycznej (która byłaby inaczej stracona) zpowrotem w ciśnienie statyczne.

Na wykresie pierwsza linia pionowa wyrysowana jest od linii zerowej (ciśnienia zerowego) w odległości wyobrażającej ciśnienie pary wody H_p , zejście poniżej którego spowoduje wytwarzanie się kieszeni próżni. Następną linia pionowa (pośrodku rysunku) wyobraża ciśnienie atmosferyczne H_a , ostatnia całkowite ciśnienie statyczne H_t (spad). Wykres przedstawiono w założeniu, że ciśnienie na tylnej stronie łopatki spada aż do wartości ciśnienia pary t. j. granicy, przy której powstaje kawitacja.

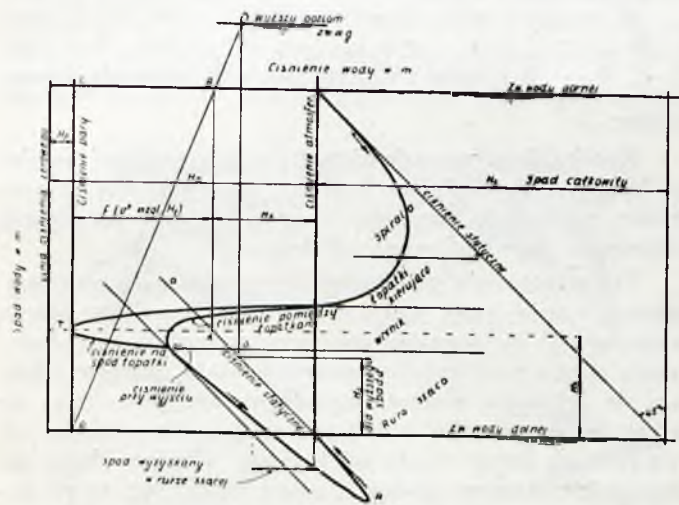
Z wykresu łatwo odczytać, że wartość od zera do H_a składa się z trzech czynników H_s , H_p i trzeciego, który wyobraża spadek rzeczywistego ciśnienia poniżej ciśnienia statycznego w tym punkcie i równa się $H_a - H_p - H_s = f(v^2) = f(H_t)$. Spadek ten jest proporcjonalny do kwadratu prędkości, zaś prędkość jest proporcjonalna do pierwiastka ze spadu, wypływa stąd, że spadek ciśnienia jest funkcją liniową całego spadu. Wyrazić to można inaczej przez

$$\delta H_t = H_a - H_p - H_s, \text{ lub } \delta = \frac{H_a - H_p - H_s}{H_t}$$

Jest to warunek kawitacji, wyobrażony przez bardzo prosty wzór.

Z rysunku możemy odczytać, że kąt BOC określa nam wartość δ , gdyż jest to kąt którego tangens równa się δ .

Jeżeli w przybliżeniu przyjąć, że punkt najniższego ciśnienia pozostaje stale w tej samej odległości od wylotu z wirnika, to łatwo jest na podstawie podanego wykresu uzmysłowić sobie wpływ zwiększonego spadu H_t na wysokość umieszczenia wirnika. Jeżeli prze-



Rys. 4.

bieżnych trzeba zwrócić uwagę na jeden ważny czynnik. Przepływ wody w turbinach propellerowych i Kaplaniana różni się znacznie od przepływu w turbinach wolnobrotowych, których liczne łopatki o dużej powierzchni tworzą serię kanałów, w których ciśnienie wody maleje stopniowo od wlotu aż do wyjścia. Inaczej się rzecz przedstawia w turbinach szybkobieżnych, gdyż tutaj nieliczne łopatki nie tworzą między sobą kanałów, wywołujących regularny przepływ wody. Pomiar ciśnienia, wykonany na zewnętrznej i wewnętrznej stronie łopatek turbin propellerowych, wykazują, że najniższe ciśnienie nie wytwarza się w punkcie wejścia do przewodu ssącego, lecz w środkowym punkcie

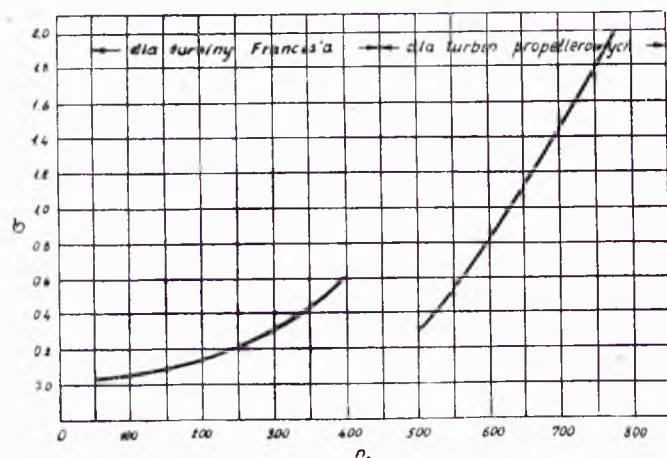
¹⁾ W. Spannhake. Cavitation and its influence on hydraulic turbin design. New York, 1932.

dłużymy linię OB do przecięcia z poziomem nowego zwierciadła i z punktu przecięcia D opuszczamy prostopadłą, to jej przecięcie z linią ciśnienia statycznego $Q-R$ da nam wartość H_s dla tego zmienionego poziomu wody górnej. Jak widzimy z rysunku, wartości H_s w miarę podwyższania wody górnej maleją i mogą się stać nawet ujemne. Ta właściwość właśnie sprawia dużą trudność przy projektowaniu turbin Kaplana na wyższe spadki, powodując znaczne koszty wykonania fundamentów.

Badania dalsze nad zjawiskiem kawitacji w turbinach doprowadziły do ustalenia dla δ zależności

$$\delta_{kr} = K + a \frac{D}{H_t} + b \left(\frac{D}{H_t} \right)^2,$$

gdzie K jest pewną stałą wartością, zależną od typu wirnika, wielkości otwarcia aparatu kierującego, stosunku prędkości skrajnej wirnika do $\sqrt{2g H_t D}$ — średnicą wirnika, a i b stałymi, wyznaczalnymi drogą doświadczalną i zależnymi od tych samych czynników, co K . Wyraz trzeci, będący wartością stosunkowo niewielką, może być opuszczony i warunek kawitacji wyrażony dostatecznie dokładnie przez $\delta = K + a \frac{D}{H_t}$.



Rys. 5.

Badania A. Davis'a¹⁾ wykazują, że korozja kawitacyjna w turbinach Francis'a występuje przy całkowitym spadzie większym niż 9,7 m. Przy mniejszych spadkach objawia się tylko spadek sprawności turbiny, zaś przy większych — spadek sprawności, wywołany korozją oraz gwałtownymi wstrząśnieniami.

Ankieta, przeprowadzona w St. Zjednoczonych przez *National Electric Light Association* w 225 zakładach wodnych, wykazała, że zniszczenie objawia się szybko na spodniej części łopatek w wypadkach zbyt dużej wysokości ssania. Dla dwóch wirników, umieszczonych na jednej osi pionowej, górny, umieszczony w wysokości 7,20 m nad wodą dolną, wykazał po 5-ciu latach pracy bardzo silne zniszczenie, gdy przeciwnie dolny, nawet po 19-u latach pracy, nie wykazał śladów zniszczenia.

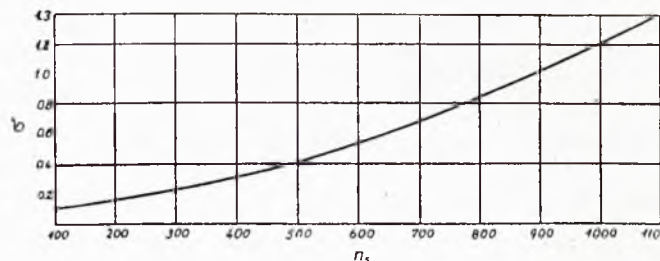
Wynik ankiety wykazywał, że zjawisko kawitacji zależy od typu turbiny, prędkości wody, mocy, spadku, średnicy wirnika, wysokości ssania i rodzaju rury ssącej.

¹⁾ A. Davis. Report of hydraulic power comittee 1924, N. E. L. A. New York.

Rezultaty ankiety można zgrupować w następującej tabeli.

	średn. wirnika	wysokość ssania		
		bardzo silne zniszczenie	średnie zniszczenie	brak śladów zniszczenia
	1,20	8,25	7,50	5,70
	1,20 — 2,40	7,80	7,20	4,20
	> 2,40	6,85	6,20	5,70

Przy tej samej wysokości ssania na kawitację ma wpływ bieżność turbiny. Im turbiny szybciejbieżne, tem zjawisko kawitacji może łatwiej zajść. Dąży się zwykle do zwiększenia bieżności turbiny, ze względu na mniejsze wówczas wymiary wirnika. Zależność pomiędzy współczynnikiem δ i ilością zredukowanych obrotów podaje wykres przedstawiony na rys. 5¹⁾ i rys. 6²⁾.



Rys. 6.

Jeżeli stosując podany wykres δ n_s określimy teraz wartość H_s dla przykładu rozważanego poprzednio, przyjmując dla turbiny wolnobieżnej $n_s = 80$, to wypadnie ona, biorąc z wykresu (rys. 5) $\delta = 0,039 H_s \leq 2,20$ m, zaś przy $n_s = 100$ i $\delta = 0,046 H_s \leq 0,6$ m.

W wypadku turbiny Kaplana przy $n_s = 500$ i $\delta = 0,4$ (rys. 6) $H_s \leq 10 - 4,0 \leq 6,0$ zaś przy $n_s = 800$, $\delta = 0,82$ $H_s \leq 10 - 8,2 \leq 1,8$ m. Widzimy stąd o ile odbiegają te wartości od poprzednio określonych zależnie od zmiany bieżności turbiny.

Kawitacja występuje nie tylko pod łopatkami turbin, ale i w innych częściach turbiny, wewnętrznej stronie łuków, względnie wszędzie tam, gdzie jest możliwym oderwanie się strugi wody od ściany.

Doświadczenia, przeprowadzone nad wpływem wysokości ssania, przy stałej wartości całkowitego spadku wykazują³⁾, że początkowo przy wzroście wysokości ssania sprawność turbiny pozostaje stałą, poczem objawia się jej mały wzrost, wywołany zmniejszeniem się tarcia przy początku kawitacji, wobec rozpoczęcia odrywania się strugi wody od łopatek wirnika, dalej następuje gwałtowny spadek. Należy zauważyć, że po pewnym czasie to zwiększenie sprawności może się zmienić na stały spadek.

Przeciążanie turbin, trwające krótko, może odbić się później niekorzystnie na ich pracy, gdyż i tu może zajść zjawisko kawitacji, obniżając sprawność turbiny na stałe.

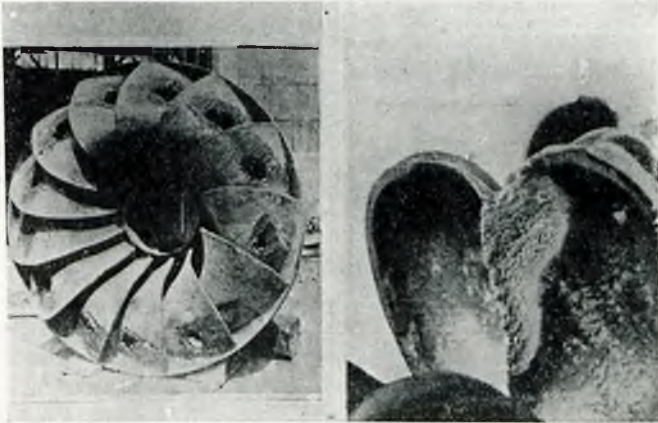
Jeżeli istnieją słabe objawy kawitacji, to jej skutki objawiają się bardzo powoli, dopiero po szeregu lat, przeciwnie, jeśli kawitacja jest silną, zniszczenie na-

¹⁾ D. Thoma. Die Kavitation bei Wasserturbinen. Wasserkraftjahrbuch 1924.

²⁾ H. Popow. Turbiny sowremiennych gidroustanowok, 1934 r.

³⁾ J. Laurent. Rapport sur l'usure des turbines hydrauliques. 1932.

stępuje nieprawdopodobnie szybko. Znanym jest wypadek zniszczenia śruby okrętu w ciągu trzech miesięcy pracy (D. Silberrad. The erosion of high speed screw propellers. Engineering. 1912). Śruby statku „Mauretania“ wykazywały dziury w materiale głębokości 60 mm. Jak wygląda turbina zniszczona przez kawitację, obrazuje rys. 7, przedstawiający turbinę Francis'a (po roku pracy¹⁾).

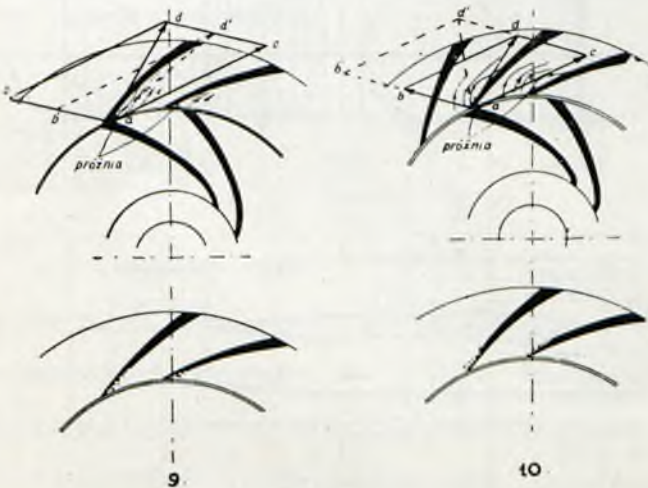


Ryc. 7.

Ryc. 8.

Zjawisko kawitacji może zajść również i w turbinach Pelton'a, gdyż pod strugą wody na łopatkach wytworzyć się mogą w pewnych wypadkach próżnie. Rys. 8 przedstawia taki rodzaj zniszczenia łopatki koła Pelton'a centrali San Francisco N = 26000KW, H = 740 m (po 5000 godzin pracy²⁾).

W turbinach szybkoobrotowych dla otrzymania wysokich współczynników sprawności trzeba pracować możliwie blisko prędkości i ciśnień, które powodują kawitację. Kawitacja jest zjawiskiem, stanowiącym granicę dla współczynnika sprawności turbin.

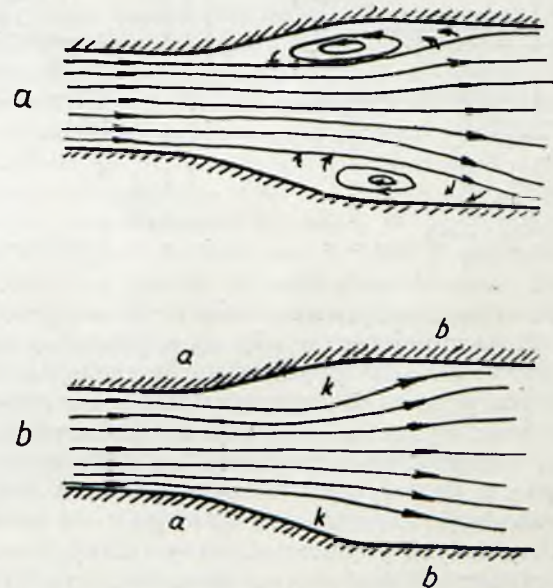


Rys. 9.

Rys. 10.

Opisane zjawiska kawitacji dotyczyły wypadków pojawiania się jej w turbinach wodnych, podobnie rzecz się przedstawia przy pompach centryfugalnych. Częstka wody, wychodząca z wirnika, posiada dwie prędkości składowe: jedną styczną do wirnika (ac) rys. 9, drugą styczną do krzywizny łopatki wirnika przy

wyjsciu (ab). Składają się one w sumie na wypadkową (ad). Warunkiem koniecznym prawidłowego przepływu wody pomiędzy łopatkami koła kierowniczego, aby nie zachodziły wiry i odrywanie się strugi od ścian, jest, by składowa prędkości miała kierunek styczny do łopatki koła kierującego. Jeśli jednak przepływ zostanie zmniejszony, np. do połowy, to składowa prędkości styczna do wirnika, pozostaje niezmienną, natomiast składowa prędkości wyjściowej maleje do połowy ab¹. Wypadkowa prędkości ad¹ ma kierunek odmienny od poprzedniego, tworząc kąt ze styczną do łopatki kierującej, przy wejściu do koła kierowniczego. Struga wody odrywa się w tym miejscu od powierzchni łopatki, tworząc próżnię, znikającą dopiero w pewnej odległości od wylotu. Powstaje tu omówione wyżej zjawisko kawitacji, powodujące wydatne zniszczenie łopatki. Zależnie od rodzaju materiału łopatek i charakteru pracy pompy, zniszczenie przybiera dość różne rozmiary. Jak wskazują badania, najlepiej zachowuje się w tych wypadkach brąz. Ważnym jest zwrócić uwagę, by w pompach, mających pracować w takich warunkach, że przepływy mogą być zredukowane kilkakrotnie, łopatki wirnika i kierujące były wykonywane z brązu. Zniszczenie żelaza łanego jest wielokrotnie szybsze.



Rys. 11.

Zjawisko kawitacji, wywołane przepływem zmniejszonym, powoduje zniszczenie łopatki kierującej od dołu. Odwrotnie się dzieje, gdy przepływy rosną. Jeżeli przyjmiemy, że przepływ wzrósł dwukrotnie do normalnego, podobnie jak poprzednio składowa styczna do wirnika pozostaje niezmienną, natomiast składowa prędkości wyjściowej podwaja swoją wartość (rys. 10), wobec czego wypadkowa ad¹ tworzy kąt z krzywizną łopatki kierującej, lecz w kierunku odwrotnym niż w wypadku poprzednim. Wywołuje to oderwanie się strumienia wody od ścianki wraz ze skutkami tego, o czym wspomniano wyżej.

Widzimy z tego, jak wszelkie przeciążanie pompy, względnie odciążanie przez dławienie przepływu, nie mówiąc o nieekonomiczności pracy, wpływa szkodliwie na zdrowie pompy.

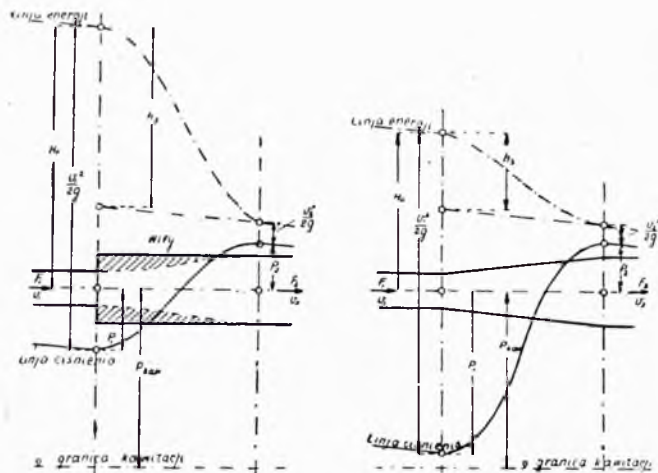
Zjawisko jednak, jak wspomniano na początku, nie ogranicza się w występowaniu tylko do maszyn wodnych, ale pojawia się i w innych urządzeniach, a więc

¹⁾ M. Dutoit et M. Monnier. Rapport général sur l'usure des turbines hydrauliques par erosion et corrosion 1932.

²⁾ N. Faletti. L'erosione e la corrosione delle turbine idrauliche. Energ. Elektr. 1934.

tam, gdzie istnieją duże prędkości wody i nieciągłości w ścianach, ograniczających przepływ. Spotkamy się więc z tem zjawiskiem przy wszelkich zamknięciach rurociągów, spustów, sztolni, gdy te zamknięcia są częściowo lub całkowicie otwarte. Stanowi to często zasadniczą wadę zamknięcia, ze względu na niszczące wpływy na obudowę metalową lub betonową. Podobnie rzecz się dzieć może, jeśli przewód, prowadzący wodę, zmienia swój przekrój stopniowo.

Początkowo nie zdawano sobie tutaj sprawy z powodów zniszczenia obudowy, która w paru wypadkach była bardzo poważną. Przypisywano zniszczenie działalności erozyjnej rumowiska i dopiero bliższe zbadanie okazało, że jest to wpływ zjawiska kawitacji, która tu zachodzi, gdy wartość ciśnienia absolutnego zbliża się do zera, a rozszerzenie przekroju, względnie krzywizna powoduje odrywanie się strugi wody od ściany.

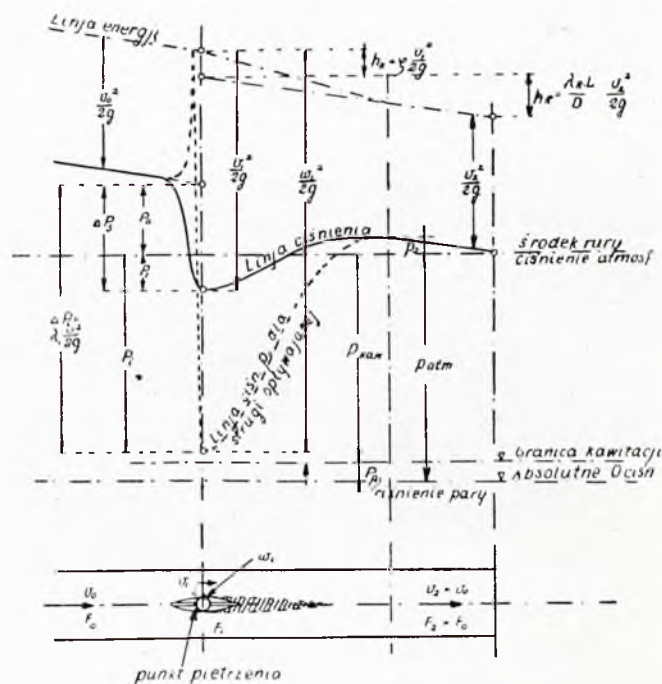


Rys. 12.

Powstawanie zjawiska kawitacji w przejściach z przekroju mniejszego w większy objaśnia się następująco. Przy małych prędkościach w ruchu burzliwym w miejscu poszerzeń, względnie łukach, tworzą się ruchy wirowe (rys. 11a), powoduje to opóźnienie sąsiadującej z wirami strugi i stałą wymianę wody w wirze, na początku woda porywana jest przepływem, w końcu zaś dopływa dzięki ssącemu działaniu, jakie się tu wytwarza. Przy dużych prędkościach wiry znikają (rys. 11b), prąd płynącej wody porywa stopniowo cząstki wody wiru na jego początku, a ponieważ niema, ze względu na dużą szybkość, dopływu wody od jego końca, ginie on i w miejscu jego powstaje próżnia, wypełniająca się parą wodną. Sprzyja to zjawisku kawitacji i naraża na zniszczenie miejsca jej zanikania, to jest okolice punktów b. Przy prędkości 14 m/sek i rozszerzeniu przekroju w pobliżu swobodnego wylotu, gdzie ciśnienie bezwzględne wynosi 10 m, ponieważ wysokość prędkości $\frac{v^2}{2g} \cong 10$ m, będziemy mieli do czynienia ze zjawiskiem odrywania się strugi na skutek spadku bezwzględnego ciśnienia do wartości zerowej.

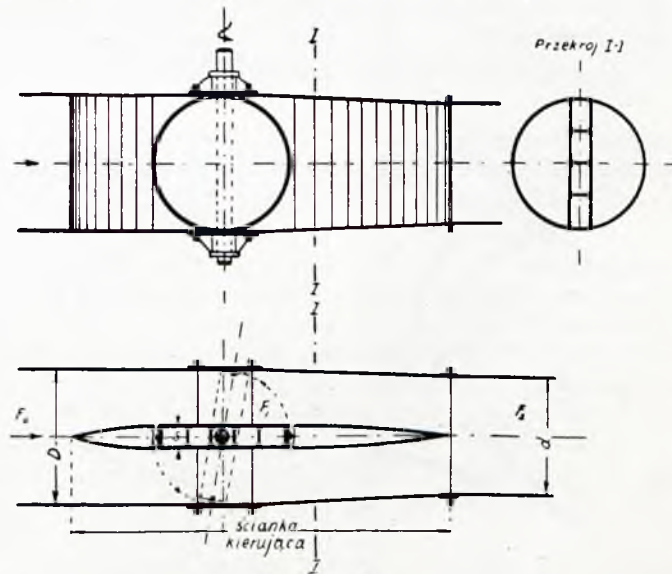
Okazuje się, że o ile ze względów hydraulicznych korzystniej jest zmianę przekroju przeprowadzać łagodnie, o tyle z uwagi na zjawisko kawitacji przekrój o nagłym poszerzeniu przedstawia większe bezpieczeństwo. Przy tem samym ciśnieniu p_2 , w obu wypadkach, w przekroju F_2 w przypadku pierwszym przeprowadzimy tą samą ilość wody przy niższem położeniu linii energii, lecz w tym też wypadku absolutne ciśnienie p_1 w przekroju F_1 będzie niższe i bliższe granicy kawi-

tacji (rys. 12). Badania nad tem zjawiskiem były przeprowadzone w Laboratorium wodnym Karlsruhe, przy doświadczeniach dla spustu w Saaltalsperre i w spuście zapory Diemel.



Rys. 13.

Rozpatrzmy jeszcze przebieg ciśnienia i możliwość kawitacji w wypadku, często stosowanej do zamknięć przewodów rurowych, kłapy motylkowej, gdy wylot przewodu niezatopiony, a kłapa umieszczona w pobliżu jego końca. Na rys. 13 wskazana jest linja ciśnienia śre-



Rys. 14.

dniego i linja ciśnienia strugi wewnętrznej, opływającej kłapę. Jak widać, ciśnienie to zbliża się bardzo do granicy kawitacji i w pewnych wypadkach może ją osiągnąć. Przedewszystkiem zdarza się to w górze i dole kłapy (osi obrotu), gdzie części kłapy mają większą krzywiznę.

Podobnie rzeczy się przedstawiają i przy innych rodzajach zamknięć (zwykł. wodoc., walcowe, Johnson'a i t. p.).

Sposoby ochrony przed zjawiskiem kawitacji są tu trojakiemu rodzaju: 1) Doprowadzenie powietrza do

przestrzeni odrywania się strug. 2) Zwiększenie ciśnienia przy korpusie zamknięcia. 3) Wytworzenie łagodniejszego przejścia dla strug, opływających klapę. Z nich pierwszy zastosowany został w paru amerykańskich zaporach przy zamknięciach Johnson'a, które ulegały niszczeniu wobec wytwarzania się kawitacji przy czubie iglicy. Sposób trzeci jest zastosowany przy zamknięciu motylkowym (gdzie okazuje się najpraktyczniejszym) spustu w zaporze Bleiloch (Niemcy). Rys. 14 wskazuje podobne urządzenie dla pojedynczej klapy. W zaporze Bleiloch ustawione są jedna za drugą dwie klapy i ochronione podobną ścianką kierującą.

Inż. Jerzy Decyusz

Parowiec „Normandie”

Błękitna wstęga Atlantyku 3 czerwca r. b. została zdobyta przez nowowytbudowany przez „C-nie Générale Transatlantique” na stoczni „S-té des Chantier et Aleliers de Saint-Nazaire-Penhoet” statek „Normandie”, który przebył drogę przez Atlantyk w 4 dni 3 godz. i 5 min., bijąc prawie o 12 godzin poprzedni rekord, ustalony przez niemiecki statek „Bremen”.

Słusznie jest to chlubą narodową Francji, bo pomijając nadluksus urządzenia tego statku, o którym było już dość mowy w gazetach, pod względem swej budowy jest on na współczesnym szczycie techniki.

Daje on maximum bezpieczeństwa i komfortu.

Przyspieszenie o 12 godz. przejazdu jest dla ludzi interesu ekwiwalentem jednego dnia, dlatego też podobno, pomimo bardzo wysokich cen przejazdu, cieszy się on dużą frekwencją i staje się już rentowny.

Jako porównanie wzrostu postępu techniki budowy statków morskich z napędem mechanicznym służy podana niżej tablica:

Nr. porządkowy	Długość w powodnicy	Szerokość po wręce głównej	Zapuznienie robocze	Pojemność całkowita statku	Moc maszyn głównych KM	Szybkość w węzłach ¹⁾	Ilość pełnej załogi	Ilość pasażerów	Nazwa statku
1	50	10	3,3	363	160	7		56	Scamandre 1833
2	106,5	13,4	6,5	3.200	900	13		300	l'Imperatrice-Eugenie 1864
3	231,6	26,8	10,2	38.000	68.000	25		1.600	Mauretania 1907
4	268,2	29,9	11,3	57.000	61.000	22,5		2.620	Berengaria 1912
5	276,1	30,5	11,6	65.000	61.000	22,5	1.229	3.897	Leviathan 1914
6	233	28,6	9,75	41.000	52.000	23,5	803	1.644	Ile de France 1927
7	270,7	31,0	9,75	51.800	90.000	26,25	1.000	2.200	Bremen 1929
8	254	31	9,83	50.000	—	27	—	2.000	Rex 1932
9	293,2	26,0	11,2	68.500	160.000	31	1.345	1.972	Normandie 1935
10	295	25,4		63.000		?		2.550	Quen Mary w budowie

¹⁾ 1 węzeł = 1 mila morska/godzinę czyli 1,85 km/godz.

We wszystkich wypadkach, gdzie zachodzi obawa kawitacji, muszą być zawsze przeprowadzane badania najkorzystniejszego kształtu projektowanych urządzeń, co może być wykonane w należytym urządzeniu i przystosowanych do tego laboratorjach wodnych¹⁾. Tak na przykład większe zakłady, produkujące turbiny wodne, posiadają specjalnie do tego celu urządzone laboratorja t. zw. laboratorja kawitacyjne i nie wypuszczają z fabryki żadnej turbiny bez zbadania jej modelu.

¹⁾ A. Reinhardt. Zum Ähnlichkeitsgesetz für Hohlraum-bildungen. VDI-Forschungsheft 370. 1935.

Jako zwrotne punkty tego postępu należy zaznaczyć daty.

Zastosowanie praktyczne maszyny parowej 1820 r.
 „ żelaznego kadłubu 1838 r.
 „ śruby napędnej zamiast kół 1842 r.
 „ turbiny parowej 1900 r.
 „ silnika Diesla 1910 r.

W ciągu zatem 102 lat co do swej pojemności parowiec wyrósł 185 razy i co do szybkości 4,5 razy.

Z powodu braku miejsca będą tu podane tylko ważniejsze daty, dotyczące głównych wymiarów i niektóre nowozastosowane szczegóły konstrukcyjne¹⁾.

Kadłub statku, zbudowany z wysokowytrzymałościowej stali ogólnej wagi ok. 30.000 tonn, posiada podwójne dno i boki i zapomocą 11 pokładów oraz całego szeregu poprzecznych grodzi szczelnych jest podzielony na bardzo wielką ilość komór, prawie uniemożliwiających zatonięcie statku przy zderzeniu lub storpedowaniu.

W budowie wnętrza, zarówno apartamentów luksusowych, złożonych z szeregu pomieszczeń o powierzchni do 180 m², jak i kabin klasy III, w najszerszym stopniu są uwzględnione lekkie stopy metalowe i materiały niepalne.

Pozatem nad bezpieczeństwem pożarowym, pomimo nadzwyczajnych urządzeń ostrzegawczych i zapobiegających, czuwa straż pożarna wyposażona w najbardziej nowoczesne środki ratownicze, złożona z 43 osób. Pompy, przewody wodne i t. p. są wykonane z największą zapobiegliwością.

Statek posiada trzy nadawcze stacje radjo-telegraficzne i telefoniczne oraz szereg stacyj odbiorczych, również własną sieć sygnalizacyjną i telefoniczną, posiadającą kilkaset numerów. Sieć elektryczna oświetleniowa oraz dla przyrządów pokładowych, gospodarczych, sygnalizacyjnych i innych jest całkowicie niezależna od sieci napędowej. Ogólna moc pomocniczych dynamo na prąd stały o napięciu 220 V wynosi 13.200 KW i posiada wysoko umieszczone rezerwy w postaci paru stacyj Diesel'owych.

Statek posiada nadkomplet łodzi ratowniczych, z których część motorowych i wyposażonych w radjo-stacje.

Trudno w krótkim artykule omówić wszelkie szczegóły, ale całość, sądząc z opisów i fotografii, przedstawia się imponująco.

¹⁾ Bliższe dane podaje „Le Génie Civil” Nr. 19, 20, 21 i 25 z r. 1935.