

Rys historyczny

Gospodarka wodna wymaga tworzenia magazynów wody. Potrzeba ta spowodowała powstanie jednego z najstarszych działów budownictwa inżynierskiego tj. budownictwa wodnego.

Pierwsze dane o budowie zapor sięgają 4000 lat p.n.e. i dotyczą kamiennej zapory narzutowej wykonanej w Egipcie dla polepszenia nawodnienia pól. O sztucznych nawodnieniach pól mamy również informację z terenów dawnego Babilonu (4000-3000 lat p.n.e.) oraz Chin (ok. 2300 lat p.n.e.) Około 2000 lat p.n.e. w Egipcie wybudowano sztuczny zbiornik wodny przez otoczenie budowlami ziemnymi piętrzącymi wody Nilu w jeziorze Moeris ($V \approx \text{ok. } 50 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ i $A \approx 685 \text{ km}^2$, pojemność zbiorników sztucznych w Polsce ok. $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$). Z lat późniejszych pochodzą informację o budownictwie wodnym w Mezopotanii, Indiach, Grecji i Rzymie.

Większy rozwój budownictwa wodnego i budowli piętrzących nastąpił od końca XVII w. Budowa stopni wodnych miała za zadanie stworzenie lokalnych źródeł taniej energii wykorzystywanej na miejscu jej wytwarzania oraz polepszenie szlaków wodnych. W Polsce istnieją do dzisiaj i są częściowo wykorzystywane obiekty wybudowane przez St. Staszica na terenie Gór Świętokrzyskich.

Koniec XIX wieku wprowadza przewrót w budownictwie wodnym, którego rozwój następuje gwałtownie. Wynalezienie sposobu przesyłania energii elektrycznej umożliwia wykorzystanie energii wodnej, niezależnie od lokalizacji jej źródeł. Równocześnie dzięki rozbudowie przemysłu zmniejszają się koszty budowy, umożliwiając budowę dużych budowli piętrzących (**Fanti i in.**, 1972).

Podstawowe pojęcia i definicje (USTAWA z dnia 18 lipca 2001 r. *Prawo wodne oraz Rozporządzenie Ministra...*)

Art. 9. 1. Ilekroć w ustawie jest mowa o:

- 19) urządzeniach wodnych - rozumie się przez to urządzenia służące kształtowaniu zasobów wodnych oraz korzystaniu z nich, a w szczególności:
- a) budowle: piętrzące, upustowe, przeciwpowodziowe i regulacyjne, a także kanały i rowy,
 - b) obiekty zbiorników i stopni wodnych,
 - c) stawy,
 - d) obiekty służące do ujmowania wód powierzchniowych oraz podziemnych,
 - e) obiekty energetyki wodnej,
 - f) wyloty urządzeń kanalizacyjnych służące do wprowadzania ścieków do wód,
 - g) stałe urządzenia służące do połowu ryb lub do pozyskiwania innych organizmów wodnych,
 - h) mury oporowe, bulwary, nabrzeża, pomosty, przystanie, kąpieliska,
 - i) stałe urządzenia służące do dokonywania przewozów międzybrzegowych.

25) zakładach - rozumie się przez to podmioty korzystające z wód, w ramach korzystania szczególnego albo wykonujące urządzenia wodne.

2. Przepisy ustawy dotyczące:

- 1) urządzeń wodnych stosuje się odpowiednio do:
 - a) urządzeń pomiarowych służących do pomiarów ilości oraz jakości wód, a także obserwacji poziomu zwierciadła wód podziemnych,
 - b) urządzeń pomiarowych państwowej służby hydrologiczno-meteorologicznej oraz urządzeń pomiarowych państwowej służby hydrogeologicznej, wraz z urządzeniami towarzyszącymi, zwanych dalej "urządzeniami pomiarowymi służb państwowych",
 - c) urządzeń melioracji wodnych niezaliczonych do urządzeń wodnych,
 - d) prowadzonych przez wody oraz wały przeciwpowodziowe obiektów mostowych, rurociągów, linii energetycznych, linii telekomunikacyjnych oraz innych urządzeń,
 - e) obiektów budowlanych oraz robót na obszarach bezpośredniego zagrożenia powodzią lub w wodach,
- 2) wykonania urządzeń wodnych - stosuje się odpowiednio do odbudowy, rozbudowy, przebudowy lub rozbiórki tych urządzeń,

§ 4. Ilekroć w **rozporządzeniu** jest mowa o:

- 1) **budowli hydrotechnicznej** - rozumie się przez to budowle, wraz z urządzeniami i instalacjami technicznymi z nimi związanymi, służące gospodarce wodnej oraz kształtowaniu zasobów wodnych i korzystaniu z nich, a w szczególności: zapory ziemne i betonowe, jazy, upusty, przelewy i spusty, śluzy żeglugowe, wały przeciwpowodziowe, przepusty, śluzy wałowe i mnichy, siłownie i elektrownie wodne, ujęcia śródlądowe wód powierzchniowych, wyloty ścieków, czasze zbiorników wodnych, wraz ze zboczami i skarpami, pompownie, kanały, sztolnie, rurociągi hydrotechniczne, syfony, lewary, akwedukty, stopnie wodne i progi, budowle regulacyjne na rzekach i potokach, grodzie, nadpoziomowe stawy gromadzące substancje płynne i półpłynne, porty, baseny, zimowiska, pirsy, mola, nabrzeża, bulwary, pochylnie i falochrony na wodach śródlądowych, przepławki dla ryb, w tym łososiowatych;
- 2) **budowli piętrzącej** - rozumie się przez to każdą budowlę umożliwiającą stałe lub okresowe utrzymanie wzniesionego ponad przyległy teren lub akwen zwierciadła wody bądź substancji płynnej lub półpłynnej;
- 3) **wysokości piętrzenia budowli hydrotechnicznej** - rozumie się przez to różnicę rzędnej maksymalnego poziomu piętrzenia i rzędnej zwierciadła wody dolnej, odpowiadającej przepływowi średniemu niskiemu; w przypadku prognozowanej erozji dna rzeki lub kanału należy uwzględnić również tę erozję; gdy budowla nie styka się z dolną wodą, przyjmuje się odpowiednio najniższą rzędną bezpośrednio przyległego terenu naturalnego lub uformowanego sztucznie;
- 4) **normalnym poziomie piętrzenia (NPP)** - rozumie się przez to najwyższy eksploatacyjny poziom zwierciadła wody w okresach poza wezbraniem:

- a) dla budowli hydrotechnicznych piętrzących wody okresowo (np. wały przeciwpowodziowe) za normalny poziom piętrzenia przyjmuje się poziom wody przy przepływie miarodajnym;
- b) dla budowli hydrotechnicznych znajdujących się w zasięgu cofki budowli piętrzącej za normalny poziom piętrzenia przyjmuje się położenie zwierciadła wody wynikające z krzywej cofkowej ustalonej dla NPP i średniorocznego przepływu wody;
- 5) **maksymalnym poziomie piętrzenia (Max PP)** - rozumie się przez to najwyższe położenie zwierciadła spiętrzonej wody w okresie użytkowania;
- 6) **minimalnym poziomie piętrzenia (Min PP)** - rozumie się przez to najniższe położenie zwierciadła spiętrzonej wody w okresie użytkowania; przy ustalaniu tego poziomu nie uwzględnia się okresowo niższych piętrzeń, spowodowanych np. względami bezpieczeństwa, potrzebą przeprowadzenia przeglądów i remontów lub trudnościami zaopatrzenia odbiorców w wodę;
- 7) **podstawowym układzie obciążeń budowli piętrzącej** - rozumie się przez to obciążenia występujące przy pełnej sprawności jej urządzeń i maksymalnym poziomie piętrzenia dla zbiorników retencyjnych lub poziomie piętrzenia przy miarodajnym przepływie wezbraniowym Q_m , określonym w § 56, a jeżeli poziom ten jest niższy od NPP - przy normalnym poziomie piętrzenia;
- 8) **przepływie średnim niskim** - rozumie się przez to wartość średnią arytmetyczną obliczoną z minimalnych rocznych przepływów;
- 9) **miarodajnym maksymalnym wezbraniu** - rozumie się przez to największy przepływ, jaki może się zdarzyć w określonych warunkach fizyczno-geograficznych;
- 10) **maksymalnym przepływie budowlanym** - rozumie się przez to największy przepływ, który nie powoduje przelania się przez koronę budowli tymczasowych lub przerwania tych budowli;
- 11) **obciążeniach wyjątkowych** - rozumie się przez to obciążenia występujące, gdy poziom piętrzenia przekracza poziom piętrzenia określony w pkt 5 lub gdy z powodu niesprawności urządzeń upustowych lub zdarzeń losowych występują mniej korzystne warunki pracy budowli niż dla podstawowego układu obciążeń;
- 12) **obciążeniu charakterystycznym** - rozumie się przez to obciążenia w postaci sił zewnętrznych lub oddziaływań wywołanych wpływem temperatury, skurczu, osiadania;
- 13) **konstrukcji z betonu słabo zbrojonego** - rozumie się przez to konstrukcję, w której procent zbrojenia jest mniejszy od minimalnego procentu zbrojenia konstrukcji żelbetowych;
- 14) **gruntach antropogenicznych** - rozumie się przez to grunty sztuczne powstałe w wyniku działalności człowieka;
- 15) **substancji płynnych lub półpłynnych** - rozumie się przez to substancje ciekłe lub półciekłe, zmieszane z wodą, powstałe przy eksploatacji kopalń, elektrowni i innych zakładów przemysłowych.

Budowlą piętrzącą lub przegradą nazywamy obiekt, którego celem jest stworzenie lub utrzymanie różnicy wód powyżej i poniżej budowli (Fanti i in., 1972). Najczęściej budowle piętrzące wykonane są w dolinach rzek i ich celem jest spiętrzenie wody w rzece. W warunkach polskich spiętrzenie wody ma najczęściej na celu wielozadaniowe wykorzystanie zbiornika, np.:

1. ochrona przeciwpowodziowa poprzez zmniejszenie fali powodziowej w utworzonym zbiorniku,
2. wyrównanie i powiększenie przepływów niskich dla potrzeb żeglugi, polepszenie warunków rozcieńczania ścieków, dostarczanie niezbędnej ilości wody dla ujęć znajdujących się przy zbiorniku lub poniżej zbiornika,
3. wykorzystanie energii wody powstałej w wyniku koncentracji spadów dla produkcji energii elektrycznej,
4. spiętrzenie wody dla potrzeb powiększenia głębokości żeglugowych,
5. zabezpieczenie niezbędnej rzędnej zwierciadła wody przy ujęciu,
6. zmiana ruchu rumowiska unoszonego i wleczonego przez zatrzymanie go w zbiorniku (zapory przeciw rumowiskowe),
7. stworzenie terenów rekreacyjnych.

Budowle piętrzące możemy podzielić zależnie od:

- przeznaczenia,
- materiałów, z których zostały wykonane,
- konstrukcji,
- sposobu przepuszczania wód,
- urządzeń do przepuszczania wód.

W technicznym języku polskim mamy dwa określenia dla budowli piętrzącej: zapora i jaz. Ścisłe rozgraniczenie nie jest ustalone. Różnicować je możemy według dwóch kryteriów:

- wielkości zbiornika, jaki został utworzony przez budowlę piętrzącą,
- wysokość obiektu.

Praktycznie przyjęło się, że wszystkie większe budowle piętrzące nazywane są zaporami; przy mniejszych obiektach stosowane są nazwy mieszane: zapora – dla części stałej utrzymującej piętrzenie i jaz – dla części spustowo-przelewowej wbudowanej w część stałą obiektu. **Fanti** proponuje aby przez jaz rozumieć te budowle, w których stosunek wysokości progu do grubości przelewającej się wody przez przelew jest mniejszy od 1.

Klasyfikacja budowli piętrzących

Rozporządzenie dzieli budowle piętrzące na:

- § 28. 1. Budowle hydrotechniczne dzielą się na tymczasowe i stałe.
2. Do budowli hydrotechnicznych tymczasowych zalicza się:
1) budowle hydrotechniczne, których zadaniem jest, bez względu na okres ich użytkowania, umożliwienie budowy, renowacji lub napraw innych budowli hydrotechnicznych,
2) budowle hydrotechniczne, których przewidywany czas użytkowania nie przekracza 5 lat.
3. Do stałych budowli hydrotechnicznych zalicza się inne niż określone w ust. 2.
- § 29. Stałe budowle hydrotechniczne dzielą się na:
1) budowle główne, utrzymujące piętrzenie, od których stanu zależy osiągnięcie zamierzonych efektów technicznych i gospodarczych;
2) budowle drugorzędne, nie utrzymujące piętrzenia, których awaria, uszkodzenie, remont lub okresowe wyłączenie nie powodują ani zagrożenia bezpieczeństwa budowli głównej lub ograniczenia skuteczności jej działania, ani zagrożenia dla terenów i środowiska, znajdujących się w zasięgu spiętrzenia budowli głównej, jak kierownice i wały rozdzielcze, konstrukcje chroniące przed działaniem lodu, odbojnice, kładki służbowe nie obciążone urządzeniami zamknięć upustów i ich mechanizmami wyciągowymi.
- § 30. Stałe budowle hydrotechniczne zalicza się do jednej z czterech klas ważności; I, II, III, IV. Klasami wyższymi, którym stawia się większe wymagania, są klasy o niższych liczbach porządkowych; najwyższą klasą ważności jest klasa I.
- § 31. W zależności od klasy budowli hydrotechnicznej różnicuje się warunki:
1) przepływów obliczeniowych,
2) współczynników przyjmowanych w obliczeniach statycznych,
3) bezpiecznych wzniesień koron budowli, brzegów nad określonym położeniem zwierciadła wody i poziomami wtaczania się fal,
4) wyposażenia w urządzenia technicznej kontroli budowli,
5) zakresu wymaganych studiów przedprojektowych i projektowych, w tym badań modelowych,
6) wyposażenia upustów.
- § 32. Klasę budowli hydrotechnicznych głównych określa się na podstawie wskaźników i informacji zawartych w tabeli 1; budowlę należy zaliczyć do klasy najwyższej spośród klas ustalonych na podstawie poszczególnych wskaźników.

KLASYFIKACJA GŁÓWNYCH BUDOWLI HYDROTECHNICZNYCH

Lp	Nazwa, charakter lub funkcja budowli	Opis i miano wskaźnika	Wartość wskaź. dla klasy I	Wartość wskaź. dla klasy II	Wartość wskaź. dla klasy III	Wartość wskaź. dla klasy IV	Uwagi
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Budowle piętrzące na podłożu:	Wysokość piętrzenia: H [m]	$H > 30$ m	$15 < H \leq 30$ m	$5 < H \leq 15$ m	$2 < H \leq 5$ m	Wysokość piętrzenia określona w § 4 pkt 3
	a) skalnym		$H > 20$ m	$10 < H \leq 20$ m	$5 < H \leq 10$ m	$2 < H \leq 5$ m	
2	Budowle, których awaria powoduje utratę pojemności zbiornika lub może spowodować zatopienie terenów falą wypływającą przez zniszczoną lub uszkodzoną budowlę	a) pojemność zbiornika: V [hm ³]	$F > 50$ hm ³	$20 < V \leq 50$ hm ³	$5 < V \leq 20$ hm ³	$0,2 < V \leq 5$ hm ³	Pojemność przy maksymalnym poziomie piętrzenia (Max PP)
		b) obszar zatopiony przez falę powstałą przy normalnym poziomie piętrzenia: F [km ²]	$F > 50$ km ²	$10 < F \leq 50$ km ²	$1 < F \leq 10$ km ²	$F \leq 1$ km ²	Obszar zatopiony jest to obszar, na którym głębokość wody przekracza 0,5 m
		c) liczba ludności na obszarze zatopionym w wyniku zniszczenia budowli: L [osób]	$L > 300$ osób	$80 < L \leq 300$ osób	$10 < L \leq 80$ osób	$L \leq 10$ osób	Poza stałymi mieszkańcami do liczby ludności wlicza się również załogi fabryk, biur, urzędów itp. oraz osoby przebywające w ośrodkach zakwaterowania zbiorowego (hotele, domy wczasowe itp.)
3	Budowle do nawadnień lub odwodnień	Obszar nawadniany lub odwadniany: F [km ²]	$F > 200$ km ²	$20 < F \leq 200$ km ²	$4 < F \leq 20$ km ²	$F \leq 4$ km ²	
4	Budowle przeznaczone do ochrony przeciwpowodziowej	Obszar chroniony: F [km ²]	$F > 300$ km ²	$150 < F \leq 300$ km ²	$10 < F \leq 150$ km ²	$F \leq 10$ km ²	Obszar, który przed obwałowaniem ulegał zatopieniu wodami o prawdopodobieństwie $p = 1\%$
5	Elektrownie wodne i obiekty wodne wchodzące w skład elektrowni ciepłych i jądrowych	Moc elektrowni: P [MW]	$P > 150$ MW	$50 < P \leq 150$ MW	$5 < P \leq 50$ MW	$P \leq 5$ MW	
6	Budowle umożliwiające żeglugę	Klasa drogi wodnej	-	V-IV	III-II	I	
7	Budowle przeznaczone do zaopatrzenia w wodę miast i osiedli oraz zakładów przemysłowych	Użytkowanie wody	Budowle zalicza się do klasy I lub II				Indywidualnie przeprowadzona analiza ważności użytkownika wody

§ 35. Budowle hydrotechniczne o wysokości piętrzenia nie przekraczającej 2,0 m lub gromadzące wodę w ilości poniżej 200 000 m³ nie podlegają klasyfikacji według tabeli 1, pod warunkiem, że ich zniszczenie nie zagraża terenom zabudowanym.

Kompozycja stopni wodnych. Usytuowanie budowli piętrzących

Kompozycja stopni wodnych związana jest z wymaganiami funkcjonalnymi odnoszącymi się do usytuowania budowli składającej się na całość.

Warunki terenowe w dużej mierze narzucają rozwiązania konstrukcyjne. Czynnikiem decydującym w znacznej mierze o kompozycji jest więc budowa topograficzna doliny i geologiczna podłoża. Przy wyborze osi obiektu należy dążyć do takiego rozwiązania, aby długość osi budowli piętrzącej była możliwie krótka, gdyż wpływa ona na ilość robót, a co za tym idzie na koszty budowy stopnia. Kompozycja stopnia wiąże się również bardzo silnie z ograniczeniami budowy, jej etapowaniem wynikającym z konieczności przepuszczenia wód budowlanych, możliwością dowozu materiałów budowlanych i wyposażenia obiektu. Te ostatnie czynniki mogą decydować o wzajemnym położeniu obiektów budowli.

Urządzenia wodne wchodzące w skład typowego stopnia wodnego na rzece nizinnej:

- jaz, główna budowla piętrząca (zapora ziemna z urządzeniami upustowymi),
- elektrownia wodna,
- śluza żeglugowa (awanporty),
- przepławka dla ryb,
- ujęcie wody.

Rozporządzenie....

§ 21. Budowle hydrotechniczne przegradzające rzekę powinny być wyposażone w urządzenia zapewniające swobodne przedostawanie się ryb przez przeszkodę, a zbiorniki wodne powinny być tak ukształtowane, aby były pozostawione ostoje i tarliska dla ryb.

§ 18. 1. Budowle hydrotechniczne i wchodzące w ich skład inne budowle powinny być usytuowane w oparciu o studium lokalizacyjne i projektowane tak, aby:

- 1) zapewniały zgodność z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego oraz wymogami decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu,
 - 2) zapewniały optymalizację kryteriów gospodarczych, społecznych, ekologicznych i innych,
 - 3) ograniczały skutki ewentualnej awarii lub katastrofy,
 - 4) harmonizowały z istniejącym krajobrazem, przy uwzględnieniu regionalnych cech budownictwa,
 - 5) zapewniały wykonanie niezbędnych badań geologiczno-inżynierskich,
 - 6) zapewniały realizację warunków zawartych w pozwoleniu wodnoprawnym.
2. Jeżeli budowla hydrotechniczna spełnia również funkcję obiektu komunikacyjnego, przy jej projektowaniu i wykonaniu stosuje się przepisy dotyczące budownictwa transportowego.

Rzeka nizinna płynie najczęściej szeroką doliną. Ponieważ przy niskim piętrzeniu powstają stosunkowo niewielkie (jak dla budownictwa wodnego) naprężenia w podłożu, dysponujemy większą swobodą w ustaleniu wzajemnego usytuowania obiektów.

W tych warunkach stosowane jest jako reguła następujące rozwiązania:

1. elektrownia usytuowana jest przy jednym z brzegów zależnie od istniejących możliwości transportowych i dojazdowych, przy niskim piętrzeniu pożądane jest usytuowanie przy wklęsłym brzegu rzeki;
2. do elektrowni w dalszej części przylegają urządzenia upustowe (jaz);
3. śluza i awanporty usytuowane są przy przeciwległym brzegu w stosunku do urządzeń upustowych jazu i elektrowni wodnej;
4. port jest odsunięty od osi budowli piętrzącej;
5. ujęcie wody odbywa się powyżej wejścia do portu, bliżej osi budowli piętrzącej lub po przeciwnej stronie niż znajduje się wejście do portu.

Rozwiązanie połączenia jazu z elektrownią związane jest z etapami budowy oraz warunkami przepuszczenia wód w toku budowy i eksploatacji. wykonanie bloku elektrowni w pierwszym etapie budowy pozwala na wcześniejsze uruchomienie elektrowni wodnej, która w większości przypadków jest jednym z obiektów w decydujący sposób wpływającym na ekonomikę stopnia wodnego.

Żeglugę odsuwamy na przeciwległy brzeg, odsuwamy szlaku od dużych prędkości przepływającej wody. Wejście do portu nie może być w głównym nurcie.

WYMIAROWANIE BUDOWLI HYDROTECHNICZNYCH METODĄ STANÓW GRANICZNYCH

Wymiarowanie konstrukcji należy przeprowadzić metodą stanów granicznych (wg PN-76/B-03001), rozróżniając:

- stany graniczne nośności (i obciążenia obliczeniowe),
- stany graniczne użytkowania (i obciążenia charakterystyczne).

Przy wymiarowaniu konstrukcji należy wykazać, że we wszystkich możliwych do przewidzenia przypadkach projektowych, w fazach realizacji i eksploatacji spełnione są warunki nośności i stateczności konstrukcji.

Stany graniczne

Stanem granicznym nazywamy stan po osiągnięciu którego uważa się, że konstrukcja lub jej element zagraża bezpieczeństwu lub przestaje spełniać określone wymagania użytkowe.

Stan graniczny nośności - wartość sił wewnętrznych wywołanych działaniem obciążeń obliczeniowych są nie jest większa od nośności konstrukcji lub podłoża wyznaczonej dla obliczeniowych wytrzymałości lub innych obliczeniowych cech mechanicznych materiałów i obliczeniowych parametrów geofizycznych podłoża gruntowego.

Stan graniczny użytkowania - wielkość odkształceń konstrukcji, szerokości rozwarcia rys itp., wywołanych działaniem obciążeń charakterystycznych przy założeniu charakterystycznych wartości cech mechanicznych materiałów i charakterystycznych wartości parametrów geofizycznych są nie większe od wielkości uznanych za graniczne. Wartości graniczne odkształceń, szerokości rozwarcia rys itp. powinny być uzależnione od skutków gospodarczych i ujemnych reakcji użytkowników.

Obciążenia

Obciążenie charakterystyczne (normowe) – obciążenie w postaci czynnych sił zewnętrznych lub oddziaływań wywołanych wpływami temperatury, skurczu osiadania podpór itp., ustalane na podstawie danych statystycznych; przy braku danych statystycznych, za obciążenia charakterystyczne można przyjmować obciążenia nominalne, ustalane deterministycznie odpowiednio do przewidywanego sposobu użytkowania konstrukcji.

Obciążenie obliczeniowe – obciążenie o wartości niekorzystniejszej od obciążenia charakterystycznego, równe iloczynowi obciążenia charakterystycznego i współczynnika obciążenia.

Wytrzymałość charakterystyczna (normowa) – wytrzymałość materiału ustalona na podstawie danych statystycznych i odpowiadająca określonemu prawdopodobieństwu występowania wytrzymałości

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
nie mniejszej od niej. Wytrzymałości charakterystyczne ustalane są również dla innych cech mechanicznych materiałów oraz parametrów geofizycznych gruntów.

Wytrzymałość obliczeniowa – wytrzymałość niższa od wytrzymałości charakterystycznej, równa ilorazowi wytrzymałości charakterystycznej i współczynnika materiałowego.; wartości obliczeniowe innych cech mechanicznych materiałów oraz parametrów geofizycznych podłoża gruntowego otrzymywane są również drogą dzielenia wartości charakterystycznych przez odpowiednie, częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla materiałów i gruntów.

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa

Współczynnik obciążenia γ_f – uwzględniający prawdopodobieństwo występowania wielkości obciążeń o wartościach niekorzystniejszych od obciążeń charakterystycznych

Współczynnik materiałowy γ_m – uwzględniający prawdopodobieństwo występowania wytrzymałości materiałów o niższych od wartości charakterystycznych

Współczynnik konsekwencji zniszczenia konstrukcji γ_n – przyjmowany w celu dodatkowego zwiększenia lub zmniejszenia bezpieczeństwa konstrukcji w zależności od stopnia zagrożenia życia ludzkiego i wielkości strat gospodarczych.

Współczynnik korekcyjny m - współczynnik zmniejszający lub zwiększający obliczeniowe wytrzymałości materiałów, oraz inne cechy mechaniczne materiałów, a także parametry geofizyczne podłoża gruntowego z uwagi na specyficzne cechy konstrukcji lub podłoża oraz na sposób ich obciążenia.

Podział obciążeń

Przy wymiarowaniu konstrukcji należy uwzględnić:

Podstawowy układ obciążeń budowli piętrowej - obciążenia występujące przy pełnej sprawności jej urządzeń i maksymalnym poziomie piętrzenia dla zbiorników retencyjnych lub poziomym piętrzenia przy miarodajnym przepływie wezbraniowym Q_m a jeżeli poziom ten jest niższy od NPP -przy normalnym poziomie piętrzenia.

Obciążenia wyjątkowe - obciążenia występujące, gdy poziom piętrzenia przekracza maksymalny poziom piętrzenia (Max PP) lub gdy z powodu niesprawności urządzeń upustowych lub zdarzeń losowych występują mniej korzystne warunki pracy budowli niż dla podstawowego układu obciążeń.

Obciążenie charakterystyczne - obciążenie w postaci sił zewnętrznych lub oddziaływań wywołanych wpływem temperatury, skurczu, osiadania podpór; wartości obciążeń charakterystycznych należy przyjmować według Polskich Norm.

Obciążenie obliczeniowe równe jest iloczynowi obciążenia charakterystycznego i współczynników obciążenia γ_f , współczynnika konsekwencji zniszczenia γ_n oraz współczynnika układu obciążeń γ_{Lc} .

Rodzaje obciążeń, wartości, współczynniki i kombinacje obciążeń należy ustalać wg PN-82/B-02000 oraz innych norm i przepisów właściwych ze względu na przedmiot projektowania. Na przykład, w obliczeniach statycznych konstrukcji stalowych w budownictwie hydrotechnicznym należy przyjmować następujące rodzaje obciążeń: stałe, zmienne długotrwałe, zmienne krótkotrwałe oraz wyjątkowe

Warunki stateczności budowli hydrotechnicznych

Betonowe, żelbetowe i kamienne budowle hydrotechniczne, posadowione na podłożu nieskalnym, powinny spełniać warunki bezpieczeństwa w zakresie (*Rozporządzenie...*, § 41.):

- 1) przekroczenia obliczeniowego oporu granicznego podłoża gruntowego (lub naprężeń dopuszczalnych),
- 2) poślizgu po podłożu lub w podłożu,
- 3) przekroczenia dopuszczalnych wartości osiadań i różnicy osiadań oraz przechylenia,
- 4) wypłynięcia,
- 5) przebicia hydraulicznego i sufozji gruntu podłoża i przyczółków,
- 6) naprężenia w podłożu, wywołanego obciążeniami od budowli, wraz z obciążeniami powstałymi od spiętrzenia wody.

Betonowe budowle hydrotechniczne piętrzące na podłożu skalnym powinny być spełniać warunki bezpieczeństwa w zakresie (*Rozporządzenie...*, § 42):

- 1) przekroczenia obliczeniowego oporu granicznego podłoża gruntowego (lub naprężeń dopuszczalnych),
- 2) poślizgu po podłożu lub w podłożu,
- 3) obrotu,
- 4) wystąpienia naprężeń rozciągających od strony odwodnej,
- 5) wystąpienia nadmiernych ciśnień filtracyjnych i wyporu w podstawie budowli oraz w podłożu,
- 6) przebieg hydraulicznych w szczelinach podłoża skalnego i przyczółków.

Budowle hydrotechniczne nasypowe powinny być sprawdzone w zakresie (*Rozporządzenie...*, § 43):

- 1) stateczności skarp,
- 2) gradientów ciśnień filtracyjnych i możliwości przebicia lub sufozji,
- 3) wartości ciśnienia sphywowego,
- 4) chłonności, wydajności drenaży,
- 5) wartości osiadań korpusu i podłoża budowli, w tym wartości naprężeń w korpusie i podłożu,
- 6) niebezpieczeństwa wystąpienia przesunięcia, poślizgu po podłożu i w podłożu,
- 7) niebezpieczeństwa wyparcia słabego gruntu spod nasypu.

Stateczność zboczy zbiorników należy sprawdzać z uwzględnieniem przewidywanych wahań poziomu piętrzenia, ich zakresu i prędkości zmian poziomów wody; jeżeli objętość potencjalnego osuwiska lub obrywu wskazuje zagrożenie budowli piętrzącej lub możliwość przelania się wody przez jej koronę; do obliczeń stateczności zboczy należy wprowadzić współczynnik konsekwencji zniszczenia (γ_n), taki jak dla zapory tworzącej zbiornik (*Rozporządzenie...*, § 44.).

Metoda obliczeń stateczności (*Rozporządzenie...*, § 45)

Do sprawdzenia warunków stateczności budowli stosuje się zależność, której ogólna postać w metodzie stanów granicznych jest następująca:

$$E_{\text{dest}} \leq m \cdot E_{\text{stab}}$$

gdzie:

E_{stab} - efekty obliczeniowe oddziaływania stabilizującego, którymi są:

- obliczeniowy opór graniczny podłoża gruntowego,
- suma rzutów na płaszczyznę ścicia wszystkich sił od obciążeń obliczeniowych, przeciwdziałających przesunięciu,
- moment wszystkich sił obliczeniowych, przeciwdziałających przesunięciu,

E_{dest} - efekty obliczeniowe oddziaływania destabilizującego, którymi są odpowiednio:

- wartości obciążenia obliczeniowego przekazywanego przez fundament na podłoże gruntowe,
- obliczeniowa wartość składowej stycznej wszystkich obciążeń powodujących przesunięcie w płaszczyźnie ścicia,
- moment wszystkich sił obliczeniowych powodujących obrót,

m - współczynnik zależny od rodzaju sprawdzanego warunku stateczności, rodzaju konstrukcji i przyjętej metody obliczeń konstrukcji.

Wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa

Współczynnik obciążenia γ_f

W stanach granicznych użytkowania stosuje się jedną wartość współczynnika obciążenia $\gamma_f = 1$ (PN-82/B-02000)

Przy wyznaczaniu obciążeń obliczeniowych gruntem należy przyjmować następujące współczynniki (PN-88/B-02014): dla ciężaru i parcia spoczynkowego gruntu nasypowego o kontrolowanym zagęszczeniu - 1,1 (0,9); dla ciężaru i parcia spoczynkowego gruntu o niekontrolowanym zagęszczeniu - 1,2 (0,8).

Wartości współczynnika $\gamma_f < 1,0$ należy stosować w przypadku, gdy zmniejszenie obciążeń daje niekorzystniejszy układ obciążeń.

Współczynniki obciążenia dla obciążeń działających na stalowe konstrukcje wodne

(PN-B-03203/luty 2000):

ciężar konstrukcji	1,20
ciężar urządzeń i elementów na stałe związanych z konstrukcją	1,20
hydrostatyczne parcia wody	1,35
hydrodynamiczne parcie wody	1,40
parcie rumowiska	1,40
obciążenie wywołane zanieczyszczeniami i zamulaniem	1,40
parcie lodu	1,30
parcie falowania	1,40
obciążenie wywołane jednostkami pływającymi	1,30
siły tarcia	1,35
obciążenie wiatrem	1,30
obciążenia opancerzeniem	1,20
obciążenia krat	1,15
obciążenia tłumem	1,30
wpływ zmian temperatury	1,25
obciążenie w czasie transportu	1,25
inne obciążenia	1,35

Współczynnik materiałowy γ_m (PN-81/B-03020)

Metody wyznaczania wartości parametru gruntu

Metoda A – bezpośrednie badania polowe lub laboratoryjne wartości parametru gruntu

$$x^{(n)} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad x^{(r)} = \gamma_m \cdot x^{(n)}$$

$$\gamma_m = 1 \pm \frac{1}{n^{(n)}} \left[\frac{1}{N} \cdot \sum (x_i - x^{(n)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$x^{(n)}$ – wartość charakterystyczna

x^r - wartość obliczeniowa

x_i - wyniki oznaczenia danej cechy

Nie należy przyjmować wartości γ_m bliższych jedności niż $\gamma_m = 0,9$ i $\gamma_m = 1,1$. Jeśli współczynnik materiałowy jest dalszy od jedności niż $\gamma_m = 0,80$ lub $\gamma_m = 1,25$, to należy przeanalizować przestrzenną zmienność wyników badań w celu sprawdzenia możliwości wydzielenia dodatkowych warstw geotechnicznych .

Metoda B (oznaczanie wartości parametrów wg zależności korelacyjnych) i **metoda C** (przyjęcie wartości parametrów na podstawie doświadczeń na innych podobnych terenach):

$\gamma_m = 0,9$ lub $\gamma_m = 1,1$; należy przyjmować wartość bardziej niekorzystną.

Współczynnik konsekwencji zniszczenia konstrukcji γ_n

Współczynnik konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej γ_n zależy od klasy budowli (*Rozporządzenie...*, § 37). Dla budowli hydrotechnicznych, których awaria może spowodować przerwanie obiektu piętrzącego i powstanie fali nagłego opróżnienia jego wartość przyjmuje się zgodnie z poniższą tabelą:

Klasa budowli	I	II	III	IV
Współczynnik konsekwencji zniszczenia γ_n	1,30	1,20	1,15	1,10

Dla budowli, których awaria nie powoduje skutków opisanych wyżej, przyjmuje się współczynnik z tabeli przy założeniu, że budowla jest o klasę niższa od ustalonej klasyfikacji, jednak w każdym przypadku $\gamma_n \geq 1,10$.

Do współczynnika γ_n należy stosować mnożnik w postaci współczynnika układu obciążeń γ_{Lc} , a mianowicie (*Rozporządzenie...*, § 38):

- $\gamma_{Lc} = 1,0$ - dla podstawowego układu obciążeń
- $\gamma_{Lc} = 0,9$ - dla wyjątkowego układu obciążeń
- $\gamma_{Lc} = 0,9$ - dla obciążeń występujących w czasie budowy.

Współczynnik korekcyjny m

Zgodnie z *Rozporządzeniem* MOSZNiL z 1996, jeśli Polskie Normy nie stanowią inaczej, współczynniki korekcyjne m należy przyjmować:

1) przy sprawdzeniu przekroczenia obliczeniowego oporu granicznego podłoża gruntowego i nośności gruntu:

- a) gdy stosuje się rozwiązanie teorii granicznych stanów naprężeń, $m = 0,9$
- b) przy przybliżonych metodach oznaczania parametrów gruntu, $m = 0,8$

2) przy sprawdzeniu poślizgu po podłożu $m = 0,8$

3) przy sprawdzeniu poślizgu w podłożu:

gdy przyjmuje się kołowe linie poślizgu w gruncie, $m = 0,8$

gdy stosuje się inne, bardziej uproszczone metody obliczeń, $m = 0,7$

4) przy sprawdzeniu stateczności na obrót, $m = 0,8$.

Przy sprawdzeniu stateczności skarp budowli nasypowych należy przyjmować współczynnik korekcyjny $m = 0,9$ do $0,75$ (*Rozporządzenie...*, § 52).

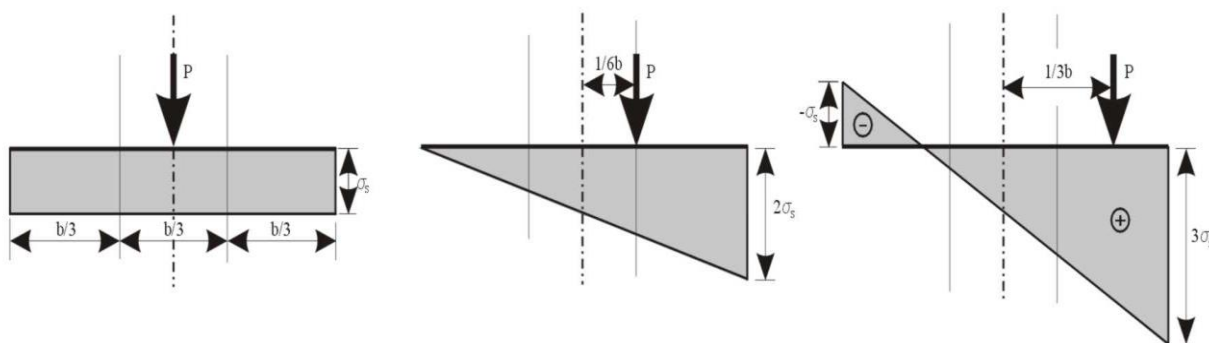
Do wyznaczania obciążeń budowli hydrotechnicznych dla metody stanów granicznych, częściowe współczynniki bezpieczeństwa, tzn. współczynniki obciążenia (γ_f), współczynniki materiałowe (γ_m)

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
 oraz współczynniki korekcyjne (m), zmniejszające lub zwiększające wytrzymałość materiałów i uwzględniające inne cechy mechaniczne, a także parametry geofizyczne podłoża, należy przyjmować według Polskich Norm (*Rozporządzenie...*, § 39).

Rozkład nacisków na podłoże

W budowlach hydrotechnicznych betonowych posadowionych na skale, obliczeniowa wypadkowa wszystkich sił poziomych i pionowych działających na budowlę piętrzącą, odniesiona do dowolnego przekroju poziomego, w tym do podstawy budowli, powinna dla podstawowego układu obciążeń mieścić się w rdzeniu przekroju i spełniać warunek $|x| \leq 1/6 \cdot b$, który eliminuje występowanie naprężeń rozciągających w korpusie budowli i podłożu, gdzie x - odległość położenia wypadkowej od środka przekroju, b - szerokość przekroju podstawy - rys. (a) (Rozp. § 46).

W przypadku wyjątkowego układu obciążeń, dopuszcza się, aby wypadkowa wszystkich obciążeń obliczeniowych wyszła poza rdzeń przekroju, przy spełnieniu warunku $|x| \leq 1/3 b$ - rys. (b) (*Rozporządzenie...*, § 47).



Rozkład naprężeń w podłożu pod budowlą

Sprawdzenie gradientów filtracji

Występujące rzeczywiste gradienty ciśnień filtracyjnych (I_{rzecz}) w korpusie zapory nasypowej oraz podłożu wszystkich budowli piętrzących winny być mniejsze od krytycznych (I_{kr}) dla danego gruntu, przy uwzględnieniu współczynnika konsekwencji zniszczenia γ_n , zgodnie z następującą zależnością (Rozp. § 50):

$$\gamma_n \cdot I_{rzecz} \leq I_{kr}$$

W wartości I_{rzecz} należy uwzględniać procesy filtracji ustalonej i nieustalonej, wywołanej wahaniami stanów wody oraz procesami konsolidacji w gruntach spoistych.. Wartości I_{kr} dla budowli hydrotechnicznej klasy I i II należy przyjmować na podstawie badań laboratoryjnych gruntu, a dla budowli pozostałych klas wartości I_{kr} można przyjmować na podstawie opublikowanych wyników badań i analiz naukowo-technicznych.

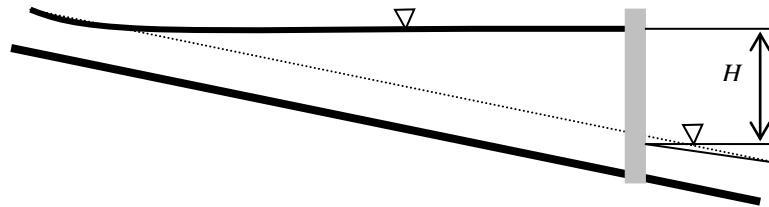
Wykorzystanie energii wody

Spadek rzeki jest rozłożony w sposób ciągły na całej długości rzeki. Spadkiem rzeki nazywamy stosunek różnicy ΔH rzędnych zwierciadła wody w dwóch przekrojach rzeki do odległości L pomiędzy tymi przekrojami:

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

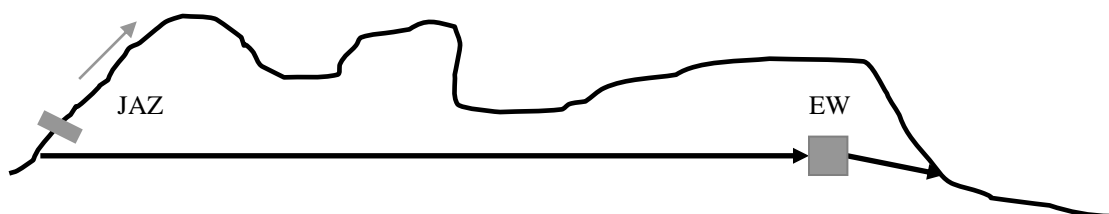
gdzie ΔH i L w metrach.

Do wykorzystania energii wodnej pewnego odcinka rzeki potrzebny jest spadek skoncentrowany, który można utworzyć różnymi sposobami zależnymi od topografii terenu. Piętrząc wodę za pomocą budowli otrzymuje się spadek H , który jest wykorzystywany w elektrowni wodnej, umieszczonej przy zaporze lub w pobliżu zapory.



Rzeka mało wcięta w teren nie pozwala na uzyskanie większych spadów za pomocą samego jazu. W takich przypadkach spadek uzyskuje się częściowo przez spiętrzenie rzeki w jej korycie za pomocą jazu, częściowo zaś przez wykopanie kanału łączącego najkrótszą trasą dwa przekroje rzeki, odległość pomiędzy którymi, mierzona wzdłuż nurtu rzeki, jest znacznie większa od długości kanału.

W dowolnym przekroju kanału jest posadowiony budynek elektrowni wodnej, który pełni równocześnie funkcję jazu piętrzącego wodę w kanale do rzędnej równej wysokości piętrzenia wody przez jaz. Spadek H elektrowni na kanale jest równy różnicy rzędnych bezpośrednio przed wlotem i za wlotem wody z elektrowni. Budowa elektrowni na kanale jest opłacalna w przypadku, gdy na jeden kilometr długości kanału otrzymujemy jeden metr spadu.



Na rzece górskiej o bardzo dużych spadkach, lecz nie mającej warunków topograficznych, umożliwiających uzyskanie dużych spadów przez wybudowanie krótkich, opłacalnych zapór, można zbudować elektrownię na rurociągu ciśnieniowym. Niski jaz piętrzy wodę tylko o tyle, aby skierować do kanału prowadzącego wodę do wlotu do rurociągu. Można przyjąć, że elektrownia na rurociągu będzie opłacalna pod warunkiem uzyskania co najmniej 15 metrów spadu na jeden kilometr długości

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok rurociągu. Opłacalność elektrowni na rurociągu będzie znacznie lepsza, jeżeli warunki topograficzne pozwolą część trasy poprowadzić kanałem bez spadku po warstwie punktu położonego nad elektrownią, skąd poprowadzony będzie krótki rurociąg do elektrowni o bardzo dużym spadku. W warunkach górskich doprowadza się wodę do rurociągu ciśnieniowego często za pomocą sztolni ciśnieniowej (uwaga na uderzenie hydrauliczne).

Elektrownie wodne: na kanale, na rurociągu, na sztolni noszą nazwę elektrowni derywacyjnych, a trasa doprowadzająca i odprowadzająca wodę nazywa się derywacją.

Spad. Określenia i pojęcia

Spad brutto elektrowni wodnej H_{br} jest to różnica rzędnych zwierciadła wody na początku i na końcu odcinka rzeki wykorzystanego energetycznie przez elektrownię. Za początek tego odcinka przyjmujemy początek krzywej spiętrzenia, za koniec – miejsce odpływu wody z elektrowni do rzeki. Spadu brutto nie używa się we wzorach energetycznych elektrowni, ma on znacznie informacyjne przy rozpatrywaniu wykorzystaniu energetycznym rzeki.

Spad netto elektrowni wodnej lub, krótko, spad elektrowni wodnej H_{el} otrzymuje się odejmując od spadku brutto straty spadku na krzywej spiętrzenia i na kanale doprowadzającym wodę do elektrowni oraz starty ΔH_2 na kanale odprowadzającym wodę do rzeki:

$$H_{el} = H_{br} - (\Delta H_1 + \Delta H_2)$$

Zgodnie z powyższą definicją spad elektrowni wodnej jest to spad geometryczny mierzony różnicą rzędnych zwierciadeł wolnych wody górnej i dolnej bezpośrednio przed i za elektrownią. Zwierciadło wolne wody górnej będzie to:

1. w elektrowni zaporowej – zwierciadło wody przy zaporze (jazie);
2. w elektrowni na kanale – zwierciadło wody przy budynku elektrowni;
3. w elektrowni na rurociągu ciśnieniowym (sztolni) – zwierciadło wody na wlocie do rurociągu (sztolni).

Zwierciadło wody dolnej za elektrownią będzie bezpośrednio za wylotem wody z rury ssącej (rys.).

Wzór Bernoulliego przedstawia spad jako różnicę energii mechanicznej jednostki ciężaru wody górnej i dolnej, na dopływie i odpływie z elektrowni:

$$H = \frac{\alpha v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\rho g} + z_d - \left(\frac{\alpha v_o^2}{2g} + \frac{p_o}{\rho g} + z_o \right)$$

Zwierciadła swobodne (wolne) wody górnej i dolnej znajdują się pod ciśnieniem atmosferycznym. W przypadku gdy wartości prędkości są tego rzędu, że różnica bezwzględna spadów prędkościowych jest mniejsza niż 0,5% spadku elektrowni, wysokości prędkości można pominąć i wtedy spad elektrowni niskospadowej wyraża się wzorem:

$$H_{el} = z_d - z_o$$

Spad turbiny H_t jest to różnica energii jednostkowej masy wody przed wlotem do turbin i za wylotem z rury ssącej. Spad turbiny w półspirali jest równy spadowi elektrowni, zmniejszonemu o straty spadu na wlocie do elektrowni. Spad turbiny na rurociągu ciśnieniowym jest równy spadowi elektrowni, zmniejszonemu o straty spadu w rurociągu. W przypadku turbiny na rurociągu ciśnieniowym można pominąć wysokość ciśnienia atmosferycznego na wypływie i w takim razie spad turbiny oblicza się ze wzoru:

$$H_t = \frac{\alpha v_d - \alpha v_o^2}{2g} - \frac{P_d}{\rho g} + z_d - z_o$$

Zmienność spadu

Spad elektrowni wodnej jest zmienny i zależy od następujących czynników:

1. od sposobu eksploatacji elektrowni;
2. od rodzaju jazu (ruchomy lub stały);
3. od zmian zachodzących w łóżysku rzeki poniżej elektrowni;
4. od warunków hydrologicznych.

W eksploatacji prowadzonej przy stałej rzędnej wody górnej (GW) wartość spadu zależy od zmian rzędnej wody dolnej (DW). Jeżeli wodę dolną elektrowni stanowi rzeka swobodnie płynąca, to rzędna DW, a zatem i spad, jest funkcją przepływu: $H=f(Q)$. Zależność $H=f(Q)$ nie będzie ulegała zmianom przy swobodnym odpływie z elektrowni, natomiast charakter tej zależności przy pokrywie lodowej będzie zmienny i zależy od grubości tej pokrywy. Również zarośnięcie łóżyska rzeki uniemożliwi stałość zależności pomiędzy rzędna DW a przepływem. Gdy DW elektrowni jest spiętrzona przez jaz leżący poniżej, to ma to wpływ na spad.

Utrzymując stałą rzędną GW uzyskuje się największy spad przy najmniejszym przepływie Q_{min} i spad najmniejszy przy największym przepływie Q_{max} . Elektrownia, która ma jaz ruchomy zdolny do przepuszczenia wielkiej wody, może utrzymać rzędną GW na stałym poziomie. Jeżeli przy tym GW elektrowni niskospadowej jest zbliżony do rzędnej WW, to spad elektrowni w czasie przepływu wielkiej wody może być równy zeru. Jazy stałe spotyka się zazwyczaj na starych do tego małych elektrowniach.

Jeżeli DW elektrowni nie jest podpiętrzona przez jaz niżej położonej elektrowni, to w korycie rzeki może zachodzić zjawisko erozji powodujące obniżenie dna cieku, co z kolei wywołuje trwałe obniżenie DW. Pociąga to za sobą zwiększenie spadu, a zatem mocy i produkcji elektrowni, co jest korzystne, z drugiej zaś strony grozi powstaniem kawitacji w turbinach, oraz dostawaniem się powietrza do rury ssącej i zerwaniem słupa wody, co uniemożliwia pracę turbin. W razie powstania takiego problemu konieczne jest podniesienie poziomu DW przez zbudowanie progu piętrzącego wodę

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZAĆCE – wybrane zagadnienia IV rok na odpływie. Jeżeli istnieją odpowiednie warunki topograficzne, korzystna jest budowa nowej elektrowni wodnej poniżej istniejącej EW.

W elektrowniach na dużych zbiornikach, pozwalających akumulować wodę, rzędna GW jest zmienna i zależy od objętości wody w zbiorniku. Wartość spadku elektrowni zbiornikowej jest uzależniona głównie od rzędnej GW, a kształtowanie się tej rzędnej zależy od pracy elektrowni prowadzonej według pewnego programu, jak również zależy od warunków hydrologicznych (lata suche i mokre). Zmienność spadku elektrowni nie daje się ująć w zależności funkcyjnej.

Moc surowa

Zasoby energii wody można wyznaczyć ze wzoru (spad pomnożony przez masę wody):

$$E = m \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot V \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta t \cdot H$$

a więc

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad [\text{W}]$$

skąd ostatecznie można wyznaczyć moc surową (przy przyjęciu gęstości wody $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$):

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}]$$

zaś energia roczna brutto w czasie 8760 godzin będzie równa:

$$E = 9,81 \cdot H \cdot Q \cdot 8760 \quad [\text{kWh}]$$

(Moc – energia uzyskiwana w jednostce czasu). Wzorem tym możemy określić zasoby energii wód płynących. Obliczając w ten sposób moc dla wszystkich odcinków rzeki, otrzymuje się moc brutto całej rzeki. Zestawienie w postaci tablic wyników obliczonej mocy i energii danej rzeki lub też wszystkich rzek danego kraju nosi nazwę katastru wodnego rzeki lub kraju.

Ustalono, że moc i energię brutto będzie obliczać się dla trzech przepływów charakterystycznych;

1. przy przepływie trwającym 95% dni w roku;
2. przy przepływie trwającym 50% liczby dni w roku;
3. przy przepływie średnim z wielolecia.

Dla celów energetyki wodnej najbardziej istotne znaczenie ma energia roczna, obliczona przy przepływie średnim wieloletnim.

Sprawność elektrowni wodnej

Sprawność elektrowni wodnej jest to stosunek mocy elektrycznej, oddanej do sieci, do mocy hydraulicznej doprowadzonej w tej samej chwili do elektrowni. Współczynniki sprawności η , wyrażane w procentach (%), dotyczą podstawowych elementów wyposażenia elektrowni różnych typów. Współczynniki te ustala zwykle dostawca oddzielnie dla turbin, generatorów i przekładni:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p$$

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
 Uwzględniając orientacyjne wartości poszczególnych składników, wypadkowa wartość współczynnika sprawności dla małego turbozespołu będzie się mieściła w granicach od 0,5 do 0,87.

Wartości współczynnika sprawności dla:	min	max
turbina	0,75	0,925
generator	0,85	0,97
przekładnia	0,80	0,98
łącznie	0,51	0,87

Charakterystyczne przepływy o moce możliwe do uzyskania w niektórych przekrojach polskich rzek, obliczone wg zależności:

$$N = 8 \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}]$$

Przekrój	Przepływ, Q [m^3/s]	Spad, H [m]	Moc, N [MW]
Wisła pod Krakowem	100	8	6
Wisła pod Warszawą	600	6	30
Wisła pod Tczewem	1000	6	50
Warta pod Poznaniem	100	5	4

Przepływ instalowany Q_i m^3/s – przelyk instalowany elektrowni – sumaryczny przelyk wszystkich zainstalowanych w elektrowni turbozespołów, przy którym elektrownia osiąga maksymalną moc w normalnych warunkach eksploatacyjnych.

Moce zainstalowane:

EW Włocławek, Wisła

$$Q_{sr} = 930 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_i = 6 \cdot 365 = 2190 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 10,4 \text{ m} \quad N = 162 \text{ MW}$$

EW Jeziorsko, Warta

$$Q_{sr} = 45,4 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_i = 2 \cdot 35 = 70 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 10,9 \text{ m} \quad N = 4,7 \text{ MW}$$

Dla porównania moce elektrowni cieplnych: Konin $N = 555 \text{ MW}$, Patnów $N = 4 \cdot 300 = 1\,200 \text{ MW}$

Klasyfikacja elektrowni wodnych

Elektrownie wodne można klasyfikować w zależności od wartości ich zasadniczych parametrów (przełyk, spad, moc) lub też od sposobu koncentrowania spadu (elektrownie zaporowe, jazowe, derywacyjne). Klasyfikacja uwzględniająca właściwości energetyczne elektrowni wodnych prowadzi do ustalenia następujących typów elektrowni:

1. elektrownie przepływowe;
2. elektrownie o zbiornikach dobowych i tygodniowym regulowaniu;

3. elektrownie o zbiornikach wielozadaniowych:

- o wyrównaniu sezonowym i rocznym częściowym,
- o wyrównaniu rocznym całkowitym i o wyrównaniu wieloletnim;

4. elektrownie w kaskadzie zwartej;

5. elektrownie pompowe i elektrownie wodne z pompowaniem.

Dla celów statystyki międzynarodowej w zależności od mocy elektrowni dzieli je się na:

małe EW $N < 10 \text{ MW}$

mini EW $N < 2 \text{ MW}$

mikro EW $N < 100 \text{ kW}$

Uchwała Rady Ministrów nr 192 z dnia 7 września 1981 r. dotycząca rozwoju małych elektrowni wodnych obejmuje elektrownie o mocy $N < 5 \text{ MW}$

Podział elektrownie wodnych wg kryterium wielkości spadu:

- o niskim spadzie, nie przekraczającym piętnastu metrów;
- o średnim spadzie, zawartym w granicach od 15 do 50 m;
- o wysokim spadzie, przekraczającym 50 m.

Elektrownie o niskim spadzie przyjmują zazwyczaj parcie spiętrzonyj wody bezpośrednio na budynek elektrowni.

Elektrownie przepływowe buduje się przeważnie na rzekach nizinnych o niskich spadach; są one zwykle pozbawione zbiorników umożliwiających regulowanie odpływu. W tych warunkach pracy maksymalne wykorzystanie ich możliwości produkcyjnych może być zapewnione jedynie przy pracy równoległej w całym systemie energetycznym, w którym do zmiennych mocy EW przepływowych można dopasować łatwo inne siłownie o prostym sposobie regulacji mocy.

Zagadnienia hydrauliczne przy projektowaniu budowli hydroenergetycznych

Ujęcia wody

Nieodzownym elementem wszystkich budowli hydroenergetycznych jest ujęcie wody zasilającej turbiny. Ujęcie wody wiąże się ściśle z osadnikami i urządzeniami płuczącymi. Jeśli te ostatnie istnieją, tworzą wówczas albo wspólną budowlę, albo wspólny zespół budowli. Ujęcia wody muszą być tak zaprojektowane by spełnić następujące zadania:

1. Zapewnić doprowadzenie określonej ilości wody do turbin;
2. Doprowadzenie wody do turbin z możliwi małymi stratami spadu;
3. Zapewnienie stałej możliwości odcięcia dopływu wody lub regulacji ilości wody doprowadzanej do turbin;
4. Eliminacja z wody rumowiska wleczonego i unoszonego niszczącego turbiny lub zmniejszającego w wyniku ich osadzania czynne przekroje;
5. Umożliwienie korzystnego rozwiązania budowli wchodzących w skład stopnia wodnego.

Ujęcia wody ze względów hydraulicznych i konstrukcyjnych dzielą się na dwie zasadnicze grupy:

1. ujęcia o swobodnym zwierciadle wody (powierzchniowe);
2. ujęcia wody pod ciśnieniem (głębinowe).

Ujęcia powierzchniowe możemy podzielić:

1. wloty bezpośrednie do siłowni niskiego spadu (typu przyjazowego lub kanałowego);
2. ujęcia przed kanałami otwartymi, sztolniami i rurociągami siłowni derywacyjnych;
3. ujęcia denne potoków górskich dla małych obiektów.

Zasadnicze wyposażenie ujęcia wody, różniące się tylko w fragmentach poszczególnych rozwiązań technicznych, obejmuje następujące elementy:

1. właściwą konstrukcję ujęcia, zwykle z żelbetu, niezależną lub wkomponowaną w budowlę piętrzącą,
2. urządzenia chroniące ujęcie powierzchniowe przed pochodem lodów, krą i wielkimi przedmiotami pływającymi (fartuchy lodowe i kraty rzadkie),
3. urządzenia chroniące wloty turbinowe przed zanieczyszczeniami płynącymi z wodą oraz zabezpieczające ryby przed wejściem w wirnik (kraty gęste),
4. zamknięcia stałe z napędami do przerywania lub regulacji dopływu wody do turbin,
5. zamknięcia rezerwowe lub awaryjne z napędami,
6. urządzenia do czyszczenia krat wlotowych i dźwigi robocze,
7. urządzenia pomocnicze, jak przewody obiegowe, napowietzniki, włazy itp.

Niezbędne obliczenia hydrauliczne powinny zawierać:

1. sprawdzenie nominalnego natężenia przepływu Q przy określonych poziomach wody, co sprowadza się do doboru czynnych przekrojów i obliczeniach prędkości wody,
2. analizę usytuowania budowli wlotowej ze względu na układ strug wody i sposób osadzania się rumowiska,
3. skontrolowanie grubości warstwy wody nad górną krawędzią wlotową dla uniknięcia napowietrzania przewodów zamkniętych,
4. ustalenie strat hydraulicznych na fartuchach lodowych, kratkach rzadkich i gęstych oraz start lokalnych przy zmianach przekrojów, kierunków przepływu, we wnękach zasuw i na zasuwach częściowo otwartych.

Ujęcia powierzchniowe są bardzo często związane z osadnikami oraz urządzeniami płuczącymi.

Osadniki, mające na celu oczyszczenie wody z unoszonych cząstek oraz zatrzymanie rumowiska wleczonego przed ujęciem, mogą być wykonane w postaci:

- rozszerzenia kanału lub koryta przed ujęciem (zmniejszenie prędkości), uzupełnionego progiem ułatwiającym zatrzymanie rumowiska,
- basenów osobno wykonanych za ujęciem lub wspólnie z ujęciem, umożliwiających osadzanie drobnych frakcji.

Urządzenia płuczące, umożliwiające w razie potrzeby usunięcie nagromadzonych osadów wykonuje się jako:

- osobne kanały płuczące umieszczone w progach ujęć i wlotów,
- kanały płuczące w osadnikach,
- otwory płuczące między wlotami do turbin.

Funkcje hydrauliczne poszczególnych urządzeń są różne. Wloty i ujęcia prowadzące całą wodę roboczą powinny odznaczać się jak najmniejszymi stratami hydraulicznymi, osadniki – skutecznym oczyszczaniem wody z rumowiska i zawiesin, zaś urządzenia płuczące – skutecznym usuwaniem osadów przy małym zużyciu wody.

Sprawdzenie natężenia przepływu

Związek między przepływem Q , polem przekroju wlotu A a średnią prędkością wody v w tym przekroju ujmuje się wzorem

$$Q = \varepsilon \cdot A \cdot v$$

gdzie współczynnik dławienia ε wynosi zazwyczaj ok. 0,92-0,97 i jest bliższy jedności, im łagodniej ukształtowane są krzywizny wlotu.

Dla ujęć o swobodnym zwierciadle wody (w siłowniach przyjazdowych i kanałowych) powierzchnia pola przekroju i kształt przekroju wlotowego – najczęściej prostokątny – wiąże się w sposób ograniczony z wymiarami spirali wlotowej, w której odbywa się stopniowe przyspieszenie strug.

Orientacyjnie można przyjąć dla wlotów całkowicie otwartych prędkość $v = 1,2-1,4$ m/s, dla wlotów z kratami czyszczonymi mechanicznie $v = 1,0-1,2$ m/s i dla wlotów do kanałów czyszczonych ręcznie $v = 0,8-1,0$ m/s. Przy wlotach do kanałów derywacyjnych przyjmuje się prędkości nieco mniejsze, zazwyczaj $v = 0,7-1,0$ m/s.

Przy ujęciach głębinowych, z uwagi na problematyczne czyszczenie krat stałych, należy redukować prędkości wlotowe do $v = 0,25-0,35$ m/s. Zasuwy wlotowe, o ile takie istnieją, umieszcza się zazwyczaj w takich przekrojach, gdzie średnia prędkość wody nie przekracza $2,0-2,2$ m/s.

Usytuowanie budowli wlotowej

W przypadku umieszczenia ujęcia w dnie zbiornika, w jego zboczach lub w budowli piętrzącej, przy dostatecznym przykryciu wodą i przy prędkości wody w zbiorniku zbliżonej do zera (do $0,1$ m/s) o usytuowaniu wlotu nie decydują względy hydrauliczne, lecz wyłącznie kompozycyjne, konstrukcyjne, topograficzne i geologiczne.

W przypadku wykonania ujęcia wody bezpośrednio w rzece lub kanale, gdzie woda płynie z większą prędkością, usytuowanie staje się jednym z głównych problemów projektowania. O wyborze usytuowania decydują trzy elementy:

- prędkość wody w korycie głównym w rejonie ujęcia;
- ilość prowadzonego przez rzekę rumowiska i lodu;
- ogólne warunki topograficzne i geologiczne oraz położenie innych budowli stopnia.

Najpoważniejszym problemem przedstawia się najczęściej ruch rumowiska. W przypadku gdy rzeka spiętrzona jest jazem, zaś woda robocza prowadzona jest do siłowni kanałem derywacyjnym, którego wlot umieszczony jest obok jazu, następuje zarówno swoisty podział wody na dwa strumienie, jak i podział rumowiska na dwie części, z których jedna osadza się w rzece a jedna w kanale.

Przy projektowaniu takich ujęć należy uwzględnić postulat, aby ilość rumowiska wprowadzana do kanału roboczego była jak najmniejsza oraz możliwe było okresowe płukanie/ usuwanie rumowiska.

Jeżeli jaz usytuowany jest na prostoliniowym odcinku rzeki, zaś kanał odgałęzia się pod kątem α , to praktyka pokazuje, iż procentowy podział ilości transportowanego rumowiska w bardzo małym stopniu zależy od wartości kąta, natomiast bardzo szybko zmienia się wraz ze zmianą ilości wody przepuszczanej przez jaz i wprowadzanej do kanału. Gdy rzeka prowadzi większe ilości rumowiska wleczzonego, wykazującego tendencję do zamulania partii wlotowych, pożądane jest wzniesienie wlotu ponad dno rzeki (lub kanału) oraz zainstalowanie oddzielnego progu kierującego osadzające się rumowisko w stronę przęsła płuczącego. Wysokość progu waha się zwykle w granicach $0,8-1,2$ m, przy czym zbyt wysoki próg przestaje być skuteczny i utrudnia wykonanie budowli wlotowej.

Wnioski dotyczące usytuowania wlotów mogą być następujące:

- ujęcie najlepiej jest sytuować na zewnętrznym łuku, przy jego końcu,
- im łuk ostrzejszy, tym usytuowanie jest korzystniejsze,
- mniejsze piętrzenie w rejonie ujęcia w rzece lub kanale wpływa korzystnie,
- progi i urządzenia płuczące są skuteczne w ograniczonym stopniu i to tylko wtedy, gdy utworzy się ogólny układ hydrauliczny zbliżony do łuku,
- sytuację można poprawić przez usytuowanie kierownic wody, urządzeń płuczących, opracowanie specjalnej instrukcji eksploatacji; są to jednak sposoby dość kosztowne.

Wysokość warstwy wody nad wlotem. W ujęciach o swobodnym zwierciadle wody, zasilających spirale turbinowe, kanały lub sztolnie, należy się jedynie upewnić, że pręty krat ze względu na tworzenie się lodu dennego i obmarzanie będą poryte warstwą wody o grubości co najmniej 0,3-0,5 m. W ostrzejszych warunkach klimatycznych (mrozy) odstęp ten podwyższa się do 1,0 m.

Przy ujęciach wody roboczej rurociągami, gdzie prędkości mogą dochodzić do 6-8 m/s, należy upewnić się, czy depresja zwierciadła wody na wytwarzanie tej prędkości równa wysokości prędkości nie obnaży górnej części wlotu, gdyż nastąpiłoby porywanie powietrza, szkodliwe dla pracy turbin i rurociągów.

Ustalenie strat na belkach przeciwlodowych, kratkach rzadkich i gęstych. Straty na belkach przeciwlodowych są zwykle pomijane. Belki umieszcza się przed wlotami, czyli tam, gdzie prędkości wody są jeszcze nieduże. Zadaniem belek jest ochrona bezpośrednia wlotów przed naporem napływającego i piętrzącego się lodu. Belki przeciw lodowe wykonane są tak aby lód nie był wciągany pod wodę i aby wytrzymały napór lodu, przyjmując parcie na powierzchnię zanurzoną w wodzie w wysokości $p = 10^4 \text{ N/m}^2$. Czasami belki bywają wykonane w postaci drewnianych elementów pływających spinanych łańcuchami.

Następnym urządzeniem są kraty rzadkie. Wykonane z grubych prętów stalowych lub nawet żelbetowych w odstępach 0,5-0,15 m, mają za zadanie zatrzymanie dużych przedmiotów pływających lub wleczonych w wodzie. Łączy je się często z belkami przeciw lodowymi lub z progiem ujęcia. Ustawione są pionowo lub pod kątem 10-20° do pionu. Przy prawidłowym wykonaniu i ustawieniu do strug wody straty spadu są tak nieznaczne, że mogą być pominięte.

Zadaniem krat gęstych sprowadza się do zatrzymania drobnych części pływających oraz ryb przed dostaniem się do turbin. Ustawia się je bezpośrednio przed wlotem do spirali turbinowej, a także przed wlotem do sztolni lub rurociągu. Kraty gęste ustawia się w nachyleniu ok. 70° do poziomu dla umożliwienia oczyszczenia; składają się one z osobnych elementów, które można oddzielnie wyjmować i wymieniać. Są wykonane kształtowników stalowych łączonych w całość poprzecznymi prętami z rozpórkami utrzymującymi równe odstępy.

Odległość między prętami krat jest zależna od prędkości wody, rodzaju turbiny i wymiaru ryb; światło krat wynosi 20-80 mm i maleje ze wzrostem spad. Starty na czystej kracie można wyliczyć według wzoru Kischmera lub wzorem uproszczonym na wysokość strat miejscowych.

Wartość współczynnika strat ξ w zależności od stosunku szerokości pręta krat d i odstępów pomiędzy prętami krat a

a/d	K=a/a+d	ξ
0,5	0,33	12,20
1	0,50	2,77
2	0,66	0,81
3	0,75	0,44
5	0,83	0,20
7	0,85	0,10
10	0,91	0,05

Straty hydrauliczne na ujęciu. Straty na ujęciu poza kratami obejmują kilka składników. Są to głównie starty od zmiany przekrojów lub od zmiany kierunku płynącej wody. Ze względu na ograniczoną długość budowli straty na tarcie mogą być zwykle pominięte. Straty wynikające ze zmiany kierunku na ujęciu oraz kontrakcji strug wody oblicza się ze wzoru:

$$\Delta h_{\alpha} = 1,3 \frac{v_1^2}{2g} - \xi \frac{v_0^2}{2g}$$

gdzie: v_1 – prędkość wody w ujęciu (m/s), przy czym zwykle $v_1 \geq v_0$,

v_0 – prędkość wody w rzece przed ujęciem, m/s,

ξ - współczynnik strat zmienny w granicach 0,8-0,4 przy zmienności kąta α od $\alpha = 30^\circ$ do $\alpha = 90^\circ$.

Straty na samym wejściu można obliczyć z zależności:

$$\Delta h_w = \xi \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g}$$

gdzie: ξ - współczynnik strat zależny od kształtu wlotu.

Dodatkowe straty powstają przy częściowym opuszczeniu zamknięcia na progu ujęcia oraz we wnękach zamknięć. Oblicza się je kolejno:

$$\Delta h_z = \left(\frac{Q}{\epsilon b d \sqrt{2g}} \right)^2$$

gdzie: Q – natężenie przepływu w rozpatrywanym przekroju, m³/s,

bd – czynny przekrój pod zasuwą, m²,

ε - współczynnik dławienia 0,80-0,85.

$$\Delta h_p = \frac{1}{\mu^2} \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g}$$

gdzie: ε - współczynnik dławienia 0,75-0,80.

Straty na wnękach można pominąć, jeżeli prędkość wody nie przekracza 2 m/s oraz gdy szerokość wnęk w przekrojach wlotowych prostokątnych jest mniejsza od 1/5 wysokości wlotu (lub 1/10 średnicy w przekrojach kołowych). W przypadku uwzględniania strat we wnękach należy je obliczać ze wysokość strat miejscowych przy przyjęciu wsp. strat $\xi = 0,10-0,20$.

Łączne straty są sumą poszczególnych strat cząstkowych i mogą dochodzić w średnio niekorzystnych przypadkach np.: na progu do 0,05 m, od zmiany kierunku do 0,1 m, od zmiany przekroju na wlocie do 0,15 m, na kratkach do 0,2 m, we wnękach do 0,1 m. Nie trudno więc dojść do ok. 0,5-0,7 m strat na samym wlocie, co przy spadach rzędu 10-15 m ma już istotne znaczenie i uzasadnia konieczność starannego zaprojektowania wlotów.

Kanały derywacyjne

W przeciwieństwie do kanałów żeglugowych, których wymiary wynikają z wielkości taboru, przy czym najkorzystniejsze są możliwie najmniejsze spadki i prędkości wody, wymiary kanałów energetycznych wynikają wyłącznie z warunków osiągania największych korzyści ekonomicznych. Ta przesłanka decyduje ostatecznie o doborze spadku dna, kształtu przekroju, prędkości wody, rodzaju umocnień itp.

Analiza sprowadza się do analizy stanów ustalonych (zwierciadło równoległe do dna) oraz sprawdzeniu wymiarów dla stanów nieustalonych, wywołanych gwałtownymi zmianami przepływów.

Właściwe wymiarowanie hydrauliczne kanałów przy określonym przepływie Q powinno zmierzać do:

- możliwie małego zajęcia terenu – cena zakupu,
- możliwie małej głębokości – koszty wykonania,
- możliwie małego przekroju – koszt ogólny,
- możliwie małego obwodu zwilżonego – koszt umocnień,
- właściwego doboru prędkości wody (górną granicę określa niszczenie okładzin, dolną powstanie osadów na dnie).

Najkorzystniejszy i najczęściej stosowany jest przekrój trapezowy, choć spotyka się także przekroje prostokątne, nieckowe i paraboliczne. Obliczenia kanału sprowadza się do znalezienia minimalnego przekroju, wystarczającego do zapewnienia żadanego przepływu przy spełnieniu przyjętych warunków odnośnie szorstkości ścian kanału i nachyleniu skarp. Pod względem czysto hydraulicznym najracjonalniejszym jest przekrój trapezowy hydraulicznie najkorzystniejszy. W

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZAŃCE – wybrane zagadnienia IV rok
praktyce wypada niejednokrotnie odejść od projektowania takich przekrojów, gdyż przy dużych przepływach głębokość staje się bardzo duża, co podraża koszty wykonawstwa.

Turbiny wodne

Turbiną wodną – nazywamy maszyny (silniki) przetwarzające energię kinetyczną wody na energię mechaniczną (na pracę użyteczną w wirniku). Z trzech postaci energii wody występującej w spadzie hydraulicznym (rów. Bernoulliego) w turbinach wodnych zużytkowuje się energię potencjalną (wys. położenia + wys. ciśnienia) i energię prędkości (wys. prędkości). W zależności od tego, w jakiej postaci energia jest doprowadzana do wirnika, dzieli się turbiny na dwa rodzaje:

1. turbiny reakcyjne (naporowe);
2. turbiny akcyjne (natryskowe).

W turbinach akcyjnych energia potencjalna jest przetwarzana w aparacie kierującym na energię prędkości. W turbinach tych ciśnienie wody przed wejściem na łopatkę jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Wirnik turbiny akcyjnej jest zasilany na części obwodu i powierzchnie tylne łopatek nie stykają się z wodą. Wirnik umieszczony jest nad zwierciadłem wody dolnej, co powoduje straty spadu.

W turbinach reakcyjnych ciśnienie wody przy wejściu na łopatkę wirnika jest większe od atmosferycznego i maleje w czasie przepływu przez przestrzeń między łopatkami wirnika. Podczas przepływu wody przez wirnik jej energia ciśnienia przemienia się w dodatkową energię kinetyczną, dzięki czemu woda w wirniku ulega przyspieszeniu. Wirnik turbiny reakcyjnej jest na całym obwodzie zasilany wodą która przepływa przez niego strugą ciągłą i za pomocą rury ssącej jest doprowadzona do dolnego poziomu. Zastosowanie rury ssącej w turbinach reakcyjnych umożliwia wykorzystanie spadku między wirnikiem, a poziomem wody dolnej.

W turbinie reakcyjnej woda przepływa między łopatkami wirnika, tworzącymi kanały konfuzyjne, wskutek czego doznaje przyspieszenia i prędkość jej zwiększa się, a krzywizna łopatek wirnika powoduje zmianę kierunku ruchu wody (rysunek). Przy wlocie do kanału woda ma prędkość c_1 , skierowaną pod kątem α_1 do osi x , a przy wylocie - prędkość c_2 , skierowaną pod kątem α_2 (pomijamy straty energii). Siła wywierana przez wodę na łopatkę wirnika:

$$F = \rho Q(c_2 \cos \alpha_2 - c_1 \cos \alpha_1)$$

Jeżeli wirnik obraca się, to do równania trzeba wstawić prędkości względne w .

W turbinie reakcyjnej woda wywiera na łopatkę dwojakie działanie:

1. reakcyjne, wywołane ciśnieniem, pod którym woda przepływa przez wirnik z przyspieszeniem względem wirnika;
2. akcyjne, wywołane krzywizną łopatki i zmianą kierunku ruchu wody.

Przepływ wody przez wirnik

Pod względem sposobu doprowadzenia wody na łopatki turbiny rozróżniamy:

1. turbiny stycznie-bierne (turbina akcyjna Peltona),
2. turbiny osiowe - Kaplana i śmigłowe,
3. turbiny dośrodkowo-osiowe – Francisa,
4. turbiny przekątne – Deriaza. (rysunek).

Przez wirnik t. osiowej woda przepływa mniej więcej w kierunku równoległym do osi obrotu turbiny, w turbinie dośrodkowo-osiowej (promieniowo-osiowej) woda, przepływając przez kanały międzyłopatkowe, zmienia kierunek z promieniowego na osiowy, zaś w turbinie przekątnej kierunek składowej prędkości wody w płaszczyźnie osi wirnika jest pod pewnym kątem. W wszystkich rodzajach t. reakcyjnych woda doprowadzana jest do wirnika na całym obwodzie za pomocą kierownicy, która nadaje jej ruch obrotowy wokół osi, przez co prędkość przepływu ma także składową obwodową.

Turbina Peltona Jest to turbina akcyjna, strumieniowa, cząstkowo-obwodowa. Stosowana jest wyłącznie dla wysokich spadów i stąd znikome możliwości wykorzystania w Polsce. Wykonywana jest w układzie poziomym lub pionowym. Woda doprowadzana jest rurociągiem zakończonym dyszą uderza w łopatki wirnika, nadając mu ruch obrotowy. Wirnik tej turbiny składa się z tarczy zaopatrzonej na obwodzie w szereg czarek rozdzielający uderzający strumień wody na dwie symetryczne gałęzie i odchylający je niemal o 180°. Liczba dysz jest uwarunkowana mocą turbiny, a przede wszystkim przełykiem. Regulacja mocy odbywa się przez przemykanie i otwieranie dysz iglicą.

Turbina Francisa Jest to turbina wodna reakcyjna o dopływie dośrodkowym, pełnoobwodowa, stosowana przy spadach od kilku do kilkuset metrów. Składa się z wirnika, kierownicy, rury ssącej oraz przestawialnych łopatek wirnika, osadzonych na piaście i wieńcu. Woda do wirnika stale całkowicie zanurzonego w wodzie jest doprowadzana do spirali z wlotów. Tylko bardzo małe turbiny o spadach 3-4 m mogą być ustawiane w otwartej komorze bez spirali. Celem spirali jest właściwe skierowanie wody na turbinę. Dopływ wody do wirnika reguluje się za pomocą kierownicy mającej łopatki nastawiane specjalnym urządzeniem pierścieniowym, stanowiącym wraz z łopatkami układ wewnętrznej regulacji turbiny. Po przejściu przez wirnik woda uchodzi na zewnątrz rurą ssawną w postaci łagodnie rozszerzającego się przewodu. Rura ssawna umożliwi odzyskanie znacznej części energii wody uchodzącej z wirnika.

Turbina Francisa jest w Polsce najpowszechniej stosowana w małych elektrowniach wodnych, zwłaszcza starszego typu. Sprawność t. Francisa dochodzi w dużych jednostkach do 94%.

Turbina Dariaza Turbina Francisa z przestawialnymi łopatkami wirnika, stosowane obecnie głównie jako maszyny odwracalne, czyli pompo-turbiny.

Turbiny Kaplana i śmigłowa Najbardziej nowoczesną odmianą turbiny wodnej są turbiny śmigłowe o nastawialnych łopatkach wirnika. Nadają się do spadów od 5 do 50 m (3-80 m). Wobec możliwości nastawienia położenia łopatek wirnika w koordynacji z położeniem łopatek aparatu kierowniczego w zależności od spadu i obciążenia, ich krzywa sprawności jest płaska i korzystna w dużym zakresie obciążeń. Wirnik wykonywany jest w postaci piasty z osadzonymi na niej kilkoma łopatkami o kształcie zbliżonym do śmigła samolotu. Łopatki są przestawialne w turbinie Kaplana, a nieruchome w t. śmigłowej. Regulacja łopatek wirnika znacznie poprawia sprawność turbiny, ale konstrukcja ta jest kosztowna; dlatego, gdy przewiduje się małą zmienność spadu stosuje się t. śmigłową lub ew. z ręcznie przestawialnymi łopatkami.

Turbiny rurowe Odmiana turbiny Kaplana, stosowana w siłowniach średniej i małej mocy w obszarze niskich spadów (< 20 m). Jej zaletami są: oszczędność miejsca, wyższa sprawność w wyniku osiowego przepływu wody. Turbina ta nie ma spirali, natomiast jest zaopatrzona w specjalnie wykonany aparat kierowniczy.

Charakterystyka turbin

Praca turbiny może odbywać się w bardzo różnorodnych warunkach, a mianowicie przy różnych: spadach przełykach, masach i prędkościach obrotowych.

Dwie turbiny, których stosunek odpowiednich wymiarów wirnika i części opływanych przez wodę jest stały, noszą nazwę *turbin podobnych*. Jest to podobieństwo geometryczne.

Przepływ strug ciągłych wody przez turbiny podobne będą podobne, jeśli będą zachowywać podobieństwo przepływów: a) kinematyczne i b) dynamiczne. Przepływy w dwóch turbinach podobnych geometrycznie będą podobne kinematyczne, jeżeli trójkąty prędkości (wlotowy i wylotowy) dla odpowiadających sobie punktów strug będą podobne, zaś podobieństwo dynamicznym będzie wyrażone przez stały stosunek wszystkich sił działających na odpowiadające sobie elementy strug w obu turbinach. Stany pracy dwóch turbin geometrycznie podobnych i pracujących w warunkach podobieństwa przepływów nazywa się izogonalnymi (ze względu na równość kątów w trójkątach prędkości).

Każdą turbinę wodną charakteryzuje współczynnik szybkobieżności i prędkość obrotowa podwójnie zredukowana.

Współczynnikiem szybkobieżności turbiny nazywa się liczbę obrotów wirnika na minutę, przy której geometrycznie podobna turbina wodna ma przy spadzie 1 m moc maksymalną równą 1 KM (Jest to prędkość obrotowa, jaką miałaby turbina podobna do danej turbiny, pracując przy spadzie $H = 1$ m i dając moc $N = 1$ KM). Wartość współczynnika szybkobieżności turbiny decyduje o podziale turbin wodnych na t. wolnobieżne, średnobieżne i szybkobieżne. Współczynnik szybkobieżności (dynamiczny wyróżnik szybkobieżności) oblicza się ze wzoru:

$$n_{sN} = \frac{n \cdot \sqrt{N}}{H^4 \sqrt{H}}$$

gdzie: n – rzeczywiste obroty turbiny, obr/min;

N – moc na wale, KM;

H – spad użyteczny, m.

Jest to prędkość obrotowa, jaką miałaby turbina podobna do danej turbiny, pracując przy spadzie $H = 1$ m z przepływem $Q = 1$ m³/s. Kinematyczny wyróżnik szybkobieżności oblicza się ze wzoru:

$$n_{sQ} = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^4 \sqrt{H}}$$

Wyznaczenie wsp. szybkobieżności, a następnie ogólny dobór turbiny na podstawie tablic oraz określenie podstawowych danych technicznych z nomogramów (pagórek sprawności) stanowi punkt wyjścia do dalszego projektowania elektrowni wodnych. Możliwy do zastosowania typ turbiny wodnej zależy od spadu i wielkości jednostki, przy czym każda z wymienionych wyżej turbin odznacza się określonym zakresem sprawności i zastosowania.

Prędkość obrotowa zredukowana

$$n'_1 = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}}$$

n'_1 jest prędkością obrotową wirnika podobnego o średnicy równej 1 m i pracującego izogonalnie pod spadem 1 m. Liczbę n'_1 nazywa się prędkością obrotową podwójnie zredukowaną. Wszystkie turbiny geometrycznie podobne mają w przybliżeniu jednakową prędkość obrotową podwójnie zredukowaną, która charakteryzuje daną serię turbin

$$n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}$$

n_1 – prędkość obrotowa pojedynczo zredukowana. Jest to prędkość obrotowa, którą będzie miała dana turbina pracująca pod spadem H z prędkością obrotową n , jeżeli będzie pracować w stanie izogonalnym pod spadem 1 m.

Przełyk zredukowany

$$Q'_1 = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}}$$

przełyk turbiny podwójnie zredukowany. Jest to przełyk znamionowy turbiny podobnej, lecz o średnicy wirnika 1 m i pracującej w stanie izogonalnym pod spadem 1 m.

$$Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}}$$

przełyk pojedynczo zredukowany. Jest to przełyk jaki będzie miała turbina pod spadem 1 m, jeżeli pracując w stanie izogonalnym ma przełyk Q pod spadem H metrów.

Konstrukcje budowlane elektrowni (siłowni) wodnej

Elektrownia wodna stanowi zespół urządzeń i pomieszczeń o odpowiednim dla każdego z nich przeznaczeniu. Urządzenia te można podzielić na dwie grupy: elektryczne i mechaniczne. Budynek elektrowni dzieli się na:

- blok podwodny lub fundamentowy
- część nawodną, położoną ponad poziomem hali maszyn.

W bloku podwodnym znajduje się zasadniczy element elektrowni – turbina wodna – na nim opiera się sprzężony wałem z turbiną generator. Turbina umieszczona jest w komorze turbinowej, w której przez spiralę doprowadzana jest woda na wirnik. Odprowadzenie wody odbywa się przez rurę ssącą. Na wlocie do siłowni zamontowane są kraty i zamknięcia główne. Od strony górnej wody na specjalnych pomostach umieszczone są urządzenia do czyszczenia krat oraz urządzenia dźwigowe do podnoszenia i zakładania zamknięć awaryjnych oraz zamknięć stałych. W bloku podwodnym znajdują się korytarze, kanały i galerie, służące do obserwacji, odwodnienia lub przeprowadzenia kabli i innych przewodów.

Główną część nawodną elektrowni wodnej stanowi hala maszyn z halą montażową, nastawnią, rozdzielnią potrzeb własnych, warsztaty oraz pomieszczenia gospodarcze i pomocnicze. W hali maszyn umieszczone są generatory, wzbudnice, regulatory, suwnice. Oprócz rozdzielni i hali maszyn, w siłowni wodnej znajduje się wiele pomieszczeń niezbędnych do jej eksploatacji:

- operacyjne związane bezpośrednio z kierowaniem pracą siłowni (nastawnia);
- pomocnicze – akumulatorownia, agregat ładujący, laboratoria pomiarowe, warsztaty, olejarnia, kompresornia, stacja pomp zasilających w wodę techniczną i stacja pomp odprowadzających wodę ze spirali i rur ssących;
- administracyjno-biurowe, sanitarne itp.

Pewne cechy budynku elektrowni oraz systemy turbin wodnych odpowiadają klasyfikacji elektrowni wodnych na nisko- i średniospadowe.

Pierwszą cechą charakterystyczną elektrowni niskospadowych jest fakt, że budynek elektrowni stanowi część budowli piętrzącej i jest poddany parciu wody (parcie od strony górnej wody przenoszone jest na fundament), w odróżnieniu od budynku elektrowni średnio- i wysokospadowej, który nie bierze udziału w piętrzeniu wody (choć niekiedy bywa wkomponowany w zapórę).

Różny jest również sposób doprowadzenia wody do turbiny:

- w elektrowniach niskospadowych – za pomocą wlotu do turbin i półspirali;
- w elektrowniach średniospadowych – za pomocą rurociągu i spirali pełnej.

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZAŃCE – wybrane zagadnienia IV rok

Wspólną cechą elektrowni nisko- i średniospadowych jest to, że wyposażone są w turbiny reakcyjne – Kaplana, Deriaza i Francisa. W obecnie projektowanych elektrowniach niskospadowych można zastosować turbozespoły Kaplana (lub śmigłowe) w układzie pionowym lub też turbozespoły rurowe, również z turbiną Kaplana w układzie poziomym lub pochylonym.

Jak z tego widać, w ogólnym przypadku najtrudniej przedstawia się zaprojektowanie siłowni wodnych przyjazowych lub na kanałach, a więc siłowni niskiego spadku. W sensie konstrukcyjnym siłownia niskiego spadku może być rozdzielona na 2 części. Jedna z nich, dolna, obejmuje cały fundament, całą wysokość partii wlotowej, spiralę rurę ssącą (ssawną) i masywy otaczające turbinę i generator aż do poziomu hali maszyn. Część ta odznacza się monolitycznym charakterem konstrukcji, wykonanej wyłącznie z betonu, obejmującego zarówno partie niezbrojone, jak i zbrojone (blok siłowni). Część górna powyżej podłogi hali maszyn, obejmująca obudowę samej hali z dachem, konstrukcję podsuwnicową, pomieszczenia od strony wlotu, a także płyty i belki od strony dolnej wody, na której często ustawione są transformatory i umieszczone są tory jezdne dźwigów – stanowi partię o charakterze budynku przemysłowego, tworzącą nadbudowę nad blokiem. Dla tej partii i warunków jej pracy fakt istnienia lub nieistnienia piętrenia i przepływu wody przez blok siłowni, nie ma w gruncie rzeczy żadnego znaczenia. W jej konstrukcji zastosowanie mogą znaleźć ustroje stalowe i cegła, najczęściej wykonana będzie z żelbetu, projektowanego i realizowanego według schematów budownictwa przemysłowego.

Wzajemne ustosunkowanie bloku i nadbudowy siłowni może kształtować się rozmaicie. Dla spadów rzędu 5-10 m, podłoga hali maszyn jest często umieszczana ponad poziomem zwierciadła wody górnej; wtedy granica między blokiem i nadbudową jest pozioma. Kiedy spadki rosną partia blokowa staje się relatywnie coraz wyższa, zaś nadbudowa coraz niższa, w niektórych typach elektrowni może w ogóle prawie zaniknąć, wtapiając się niejako w blok siłowni (siłownia związana z masywem zapory). Rozwiązania konstrukcyjne siłowni bywają bardzo rozmaite i nie może być mowy o żadnej typizacji.

Napływ wody do turbin reakcyjnych

W turbinach reakcyjnych trzeba doprowadzić wodę równocześnie na całym obwodzie z możliwie małymi stratami. Zadanie to spełniają komory wlotowe. Konstrukcja komory wlotowej i zakres jej zastosowania zależą od rozmiarów turbiny, przelotyku i spadku pod jakim pracuje. Stosuje się komory wlotowe o napływie swobodnym – komory otwarte i zamknięte, jak również komory wlotowe o napływie wymuszonym – spirale bezciśnieniowe, kotły, półspirale i spirale. (wykres stosowania)

W komorach otwartych zwierciadło wody jest swobodne. Stosuje je się dla małych turbin o średnicach wirnika nie przekraczających 1,2 m, przy spadach z reguły nie przekraczających 5-6 m, wyjątkowo 10 m. Dla zapewnienia dostatecznie dobrych właściwości trzeba ograniczyć prędkość dopływu wody do 0,8-1 m/s, natomiast w rzucie z góry szerokość i długość komory powinna być

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
równa 3- do 4,5 D . Najmniejsze rozmiary komory w rzucie z góry nie powinny być mniejsze od 2x2 m. Dla zapewnienia prawidłowej pracy turbiny należy ją zagłębić o h' pod zwierciadło wody w komorze. Wielkość h' zabezpiecza przed tworzeniem się wirów sznurowych i zasysaniem powietrza przez turbinę o osi pionowej. Powinna ona być równa:

$$h' = \frac{H}{4} + \frac{D}{2} \quad \text{dla turbin śmigłowych,}$$

$$h' = \frac{H}{4} + \frac{D}{4} \quad \text{dla turbin Francisa.}$$

Pełna głębokość komory przy najmniejszym zwierciadle roboczym wody powinna wynosić $h \geq (1,5..2,0)D$. Komory otwarte nie zapewniają prawidłowego doprowadzenia wody do kierownicy turbiny (kierunki przepływu wody), dlatego stosuje się ścianki kierujące, noski itd.

Komory zamknięte nie mają zwierciadła swobodnego wody. Wymiary komory takie same jak komór otwartych, lecz turbiny mogą być położone przy mniejszym zanurzeniu w stosunku do zwierciadła wody przed komorą.

Spirale beziśnieniowe są korzystniejsze od komór otwartych, ponieważ lepiej ukierunkowują wodę, przez co zapobiegają tworzeniu się wirów sznurowych. Przekrój poprzeczny prostokątny spirali mienia się w sposób płynny. Kat opasania od 180^0 do 250^0 . Minimalna głębokość zanurzenia zabezpieczająca przed zasysaniem powietrza przez turbinę jest 1,5-2 razy mniejsza od głębokości dla komór otwartych i można ją obliczyć z zależności:

$$h' = 0,42\sqrt[3]{D^2H}$$

Półspirala jest najczęściej stosowanym typem komory wlotowej w elektrowniach niskospadowych. Przy dużych przełykach zastosowanie półspirali pozwala oszczędzić miejsce zajmowane przez turbinę i skrócić długość budynku elektrowni. Półspirale wykonuje się najczęściej z betonu i mają one przekroje poprzeczne zbliżone kształtem do trapezu. Kat opasania od 110^0 do 270^0 .

Spirale stosuje się przy spadkach średnich i dużych ($H > 30$ m); odznaczają się one dużymi kątami opasania ($330-345^0$). Są spawane z blachy stalowej lub odlewane, o przekrojach poprzecznych okrągłych lub eliptycznych.

Komory wlotowe turbozespołów prostopływowych - stosuje się komory wlotowe otwarte i zamknięte. Komory zamknięte mają kształt cylindryczny lub konfuzorowy, o przekroju poprzecznym kołowym, kwadratowym lub prostokątnym.

Rura ssąca (ssawna)

Rura ssąca jest bardzo ważną częścią siłowni wodnej z turbinami reakcyjnymi. Spełnia ona dwa zadania:

1. umożliwia wykorzystanie spadku geometrycznego zawartego między wirnikiem turbiny, a zwierciadłem wody dolnej;

2. pozwala odzyskać znaczną część energii kinetycznej unoszonej przez wodę wypływającej z wirnika z pewną prędkością południkową (styczną) średnią c_3 .

Dla spełnienia zadania pierwszego wystarczy połączyć wylot wirnika z wodą dolną za pomocą rury o przekroju stałym, natomiast dla odzyskania energii rura musi mieć kształt dyfuzora o zwiększających się powierzchniach przekroju poprzecznego.

Działanie rury ssącej wyjaśnić można, obliczając ciśnienie w przekroju leżącym bezpośrednio pod wirnikiem. Równanie Bernoulliego dla przekrojów na wlocie i wylocie rury i przyjęciu zwierciadła wody dolnej jako poziomu porównawczego, można zapisać:

$$H_s + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{c_3^2}{2g} = -h + \frac{p_5}{\rho g} + \frac{c_5^2}{2g} + h_{str}$$

jeżeli uwzględnimy, że:

$$\frac{p_5}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + h$$

to otrzymujemy ciśnienie absolutne bezpośrednio pod wirnikiem:

$$\frac{p_3}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \left(\frac{c_3^2 - c_5^2}{2g} \right) + h_{str}$$

Ciśnienie pod wirnikiem powinno być większe niż ciśnienia pary wodnej nasyconej przy danej temperaturze, gdyż w przeciwnym razie nastąpi oderwanie wody od dolnej powierzchni łopatki. Wysokość H_s jest statyczną wysokością ssania, zaś wyrażenie w nawiasach przedstawia dynamiczną wysokość ssania, która jest wywołana przez zmniejszenie prędkości. W czasie postoju turbiny występuje tylko ssanie statyczne, a prędkości i starty są równe zero.

Wielkość udziału energii kinetycznej za wirnikiem w spadzie całkowitym może wynosić:

- dla wolnobieżnej turbiny Francisa, pracującymi pod wysokim spadem - 2-6%;
- dla szybkobieżnych turbin Kaplana, pracujących pod niskim spadem – do 50%.

Prędkości wypływu wody z wirników o dużej prędkości obrotowej i turbin pracujących pod wysokim spadem są rzędu 10 m/s. Woda o takiej prędkości powoduje erozję betonu. Aby temu zapobiec, w części rury ssącej w której prędkości wody przekraczają 5 m/s wykonuje się z blachy stalowej, która powinna być b. mocno zakotwiczona w betonie.

Rura ssąca stożkowa prosta odznacza się najlepszymi właściwościami hydraulicznymi. Wymiary rur ssących można łatwo obliczyć, odpowiednio do typu i szybkobieżności turbiny. Inne rozwiązania to: rura ssąca hydrokoniczna (dzwonowa), krzywak ssący – dla turbin pionowych średniej i dużej mocy, dyfuzor wylotowy.

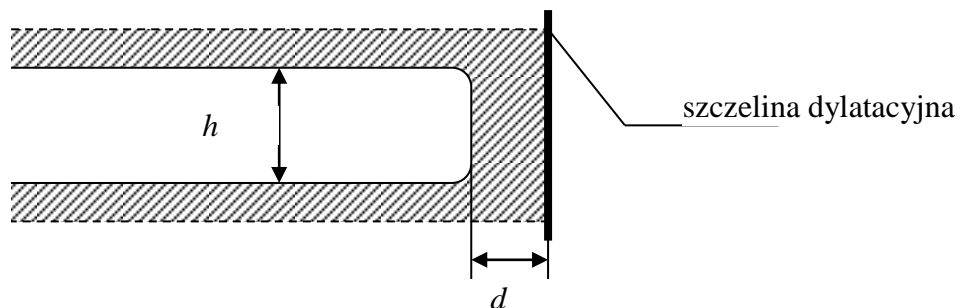
Zasady obliczania bloku siłowni

Traktując blok siłowni jako budowlę piętrzącą należy zauważyć, że gdy przy jazach i zaporach większość zagadnień statycznych sprowadza się do układów płaskich, a więc takich, gdzie rozpatrujemy pas budowli o szerokości 1 m – to w siłowni przy obliczaniu ciężarów konstrukcji należy uwzględnić przestrzenny charakter obiektów, co wynika z układu wydrżeń (wlot, spirala, szyb turbinowy, rura ssąca itd.), zajmujących jedynie część szerokości bloku.

Zważywszy, że siłownie – podobnie jak jazy i zapory – są dzielone na sekcje płaszczyznami pionowymi, prostopadłymi do podłużnej osi budowli (dylatacje), rozsądne wydaje się przeprowadzenie obliczeń dla jednej sekcji.

Zwykle sekcja ma szerokość odpowiadającą możliwości zmieszczenia w niej jednego turbozespołu, ale spotyka się też rozwiązania o dylatacjach rozmieszczonych rzadziej, gdy w jednej sekcji lokuje się 2 turbozespoły. Szerokość sekcji, na jeden zespół, powinna być tak dobrana, aby mieściła się w niej swobodnie szerokość wlotu do turbiny, poziomy zarys spirali turbinowej i poziomy rzut rury ssawnej. Wszystkie te wydrżenia muszą być odsunięte od dylatacji na określoną szerokość, gwarantującą dostateczną wytrzymałość i szczelność otuliny betonowej. Przy wysokości wydrżenia h m minimalna szerokość otuliny powinna wynosić:

$$d \geq 0,6 + 0,3 \cdot \sqrt{h} \text{ m}$$



Często jednak dają się ją większą, co może być spowodowane względami związanymi z rozplanowaniem hali maszyn i wymogami konstrukcyjnymi nadbudowy. Ogólnie biorąc szerokość sekcji wynoszą najczęściej od 15 do 30 m zależnie od wielkości maszyn, spadu i przełyku turbin. Dla turbin Francisa o spirali stalowej można je przyjmować ok. $4,2 D$, zaś dla turbiny Kaplana o spirali betonowej ok. $3,5 D$, gdzie D jest średnicą wirnika. Przy średnicy wirników turbin powyżej 3 m najmniejsza odległość pomiędzy osiami turbin może być równa $3D$, a przy średnicy mniejszej $\leq 4D$.

Ograniczony dwiema pionowymi i płaskimi dylatacjami blok siłowni tworzy zazwyczaj od wlotu do wylotu jedną monolityczną całość, nawet jeśli długość wynosi kilkadziesiąt metrów (szerokość budynku długość wlotu do osi turbiny i długość rury ssawnej od osi turbiny). Dla zapobieżenia pęknięciom blok ten musi mieć odpowiednie zbrojenie podłużne. Jeżeli zachodzą czasem okoliczności, spowodowane najczęściej niejednorodnością podłoża, blok może być rozcięty

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
dylatacjami równoległymi do podłużnej osi budowli. Następuje wtedy bądź odcięcie partii wlotowej, bądź także odcięcie dolnego odcinka rury ssawnej. Przy takim układzie rolę budowli piętrzącej przejmuje na siebie głównie partia wlotowa, zaś sam blok siłowni stanowi dla niej jedynie pewnego rodzaju podparcie przenoszące tylko taką część obciążenia, jaką partia wlotowa nań przekaże.

Szczeliny dylatacyjne muszą być uszczelnione od strony górnej wody, w identyczny sposób, jak wykonuje się to w jazach i zaporach. Jeśli dylatacje przecięte są galeriami leżącymi poniżej poziomu wody, uszczelnienie dylatacji zakłada się również od strony dolnej wody, a także od strony fundamentu.

Traktując blok siłowni jako budowlę piętrzącą, należy do jego projektu zastosować takie same kryteria odnośnie filtracji wody pod budowlą, jakie przyjmuje się dla jazów i zapór. Przy gruntach nieskalistych należy sprawdzić długość drogi filtracji, a jeżeli jest to konieczne wydłużamy ją przez wbicie ścianek szczelnych (przed wlotem i ew. poniżej rury ssawnej) lub przez dodanie fartucha szczelnego w dnie koryta doprowadzającego wodę. Przy obliczaniu wyporu należy postępować identycznie jak przy jazach lub zaporach.

Wstępne czynności statycznego obliczania bloku obejmują kolejno:

- sprawdzanie stateczności bloku na przewrócenie,
- sprawdzenie stateczności bloku na przesunięcie (poślizg),
- obliczenie obciążeń jednostkowych podłoża.

Przy sprawdzaniu stateczności bloku należy przyjmować siłę parcia wody i wyporu jak największe, a więc przy maksymalnym poziomie wody górnej i minimalnym poziomie wody dolnej. Jeśli chodzi o obciążenia pionowe, należy przyjmować je jak najmniejsze, a więc stan remontowy, bez wody, z usuniętymi maszynami – jedynie ciężar własny konstrukcji bez jakichkolwiek obciążeń.

Obliczenia ciężarów własnych wobec wydrążień o zawiłych formach, można wykonać w sposób przybliżony, jednak z zachowaniem zasady, że ciężary te powinny być obliczane raczej z niedomiarem. Ze względu na konieczność położenia wypadkowych ciężaru, wyznaczenia kubatur poszczególnych partii bloku oraz ich momentów statycznych względem wybranej osi najlepiej jest przeprowadzić je w formie tabelarycznej. Pomocne może być doświadczenie, w siłowniach niskiego spadku z turbinami Kaplana objętość wydrążień stanowi zwykle ok. 50% objętości bloku brutto.

Obliczenia obciążeń gruntu należy wykonać w sposób analogiczny, jak dla jazów, biorąc pod uwagę trzy różne schematy obciążeń:

1. stan budowlany – budowla ukończona, lecz nie obciążona wodą;
2. stan eksploatacyjny – budowla ukończona, wlot spirala i rura ssawna wypełniona wodą, największe obciążenia użyteczne, poziom zwierciadła wody górnej normalny, dolnej najniższy z możliwych dla danych założeń eksploatacyjnych;

3. stan remontowy – budowla odwodniona, założone dolne i górne zamknięcia awaryjne, bez obciążeń użytecznych, stan wody najwyższy dopuszczalny, dolnej najniższy.

(rysunek schematów obciążeń bloku siłowni w zależności od położenia fundamentu)

Problemy obliczeń i wykonawstwa bloku siłowni

Kolejność prowadzenia robót przy wykonywaniu rury ssawnej powinna być następująca:

1. po ukończeniu robót wykopowych ułożenie warstwy chudego betonu grubości 5-10 cm na gruncie;
2. montaż zbrojenia dolnej płyty;

W obliczeniach grubość płyty dolnej rury ssawnej przyjmuje się zazwyczaj nie mniejszą niż $0,10-0,15B$, gdzie B szerokość jednej sekcji. Płytę można traktować jako sztywno zamocowaną w bocznych ścianach rury ssawnej, które zazwyczaj ponad rurą przechodzą pionowo w filary podtrzymujące kładki komunikacyjne. Ze względu na możliwość ugięcia płyty następuje pewna koncentracja nacisków na grunt pod stopą filarów i ich redukcja pod środkową partią płyty. Obliczenia wykonuje się dla stanu remontowego, gdy w rurze nie ma wody. Sprawność eksploatacyjna turbin reakcyjnych wymaga bezwzględnej szczelności rury ssawnej, wobec czego jakiegokolwiek pęknięcia fundamentu uznaje się za niedopuszczalne. Te względy sprawiają, że niekiedy zbroi się płytę mocniej niż wypada to z obliczeń (szczególnie gdy podłoże nie jednolite)..

3. zabetonowanie płyty z pozostawieniem wnęki na zakotwienie filaru działowego (faza 1);
4. montaż kompletnego deskowania całej rury ssawnej fazy 1;
5. montaż zbrojenia fazy 2 (filary boczne i filar działowy) z dowiązaniem do zbrojenia fazy 1;
6. betonowanie fazy 2;
7. montaż zbrojenia fazy 3 (górną płytę i odcinki filarów) z dowiązaniem do zbrojeń fazy 2;

Jako obciążenie płyty górnej nad wylotem rury ssawnej przyjmuje się ciężar własny płyty i ciężar słupa wody nad płytą (stan remontowy). Miarodajny stan zwierciadła dolnej wody można określić jako odpowiadający przepływowi przez wszystkie turbiny z wyjątkiem pola remontowanego z dodaniem zapasu 10-20 cm. Układ zbrojenia odwrotny niż w płycie dolnej. Gdy światło rury ssawnej przekracza 5-6 m stosuje się często jego podział na 2 symetryczne pola przez dodanie filaru działowego. Wprowadzenie tego filaru, zmniejsza również rozpiętość dolnych zamknięć remontowych.

8. betonowanie fazy 3;
9. montaż zbrojenia fazy 4 w dowiązaniu do zbrojenia fazy 3;
10. betonowanie fazy 4.

Należy zwrócić uwagę, że w zbrojeniu fazy 4 prócz normalnego zbrojenia powierzchni rury ssawnej trzeba też przewidzieć specjalne bardzo mocne zbrojenie części tej fazy, gdzie tworzy ona fragment sklepienia nad rurą ssawną. Fragment ten rozwiązuje się najczęściej jako belkę

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
żelbetową pracującą na ścinanie i zginanie. Faz 4 powinna kończyć się ok. 40-50 cm poniżej
poziomu spirali – musi istnieć możliwość precyzyjnego zabetonowania spirali.

Po zabetonowaniu rury ssawnej następne etapy robót koncentrują się na partii wlotowej i spirali turbinowej. Partie wlotową, tok obliczeń i projektowanie zbrojenia identyczny jak dla rury ssawnej, z tą różnicą, że miarodajny jest stan budowlany, w którym największe naciski na grunt są w tej części bloku, a wlot nie jest obciążony wodą. Wysokość masywu betonu nad wlotem jest duża, często wykonuje się w nim szereg wydrążeń (wtedy szereg belek). Każde większe wydrążenie w betonie jest „owinięte” zbrojeniem (z. pierścieniowe). Przy dużych wymiarach dzieli się wlot na części przez wprowadzenie filarów działowych. Liczba filarów waha się do 1 do 3.

Zbrojenie często projektuje się w tych partiach, które ze względów statycznych nie wymagają zbrojenia, lecz które chcemy zabezpieczyć przez zarysowaniem i pęknięciami (lica filarów, wnęki zasuw i zamknięć remontowych, wydrążenia o wymiarach większych niż 1x1 m).

Przy betonowaniu należy pamiętać aby profile krążyn i deskowań partii wlotowej, spirali oraz rury ssawnej wykonać ściśle wg rysunków dostarczonych przez dostawcę turbin. Stosowanie profili rozszerzonych z myślą, że ostatecznie ukształtowanie powierzchni betonowych nastąpi przez pokrycie ich gładką wyprawą narzucaną na surowy beton jest błędne (podciśnienia w rurze ssawnej). Wszystkie profile powinny być wykonane z precyzyjną zgodnością z projektem (± 1 cm). Powierzchnia betonów kontaktujących się z wodą powinny być bardzo gładkie. Wszelkiego rodzaju otworów i zagłębień powinny być przygotowane w formie skrzynek; należy bezwzględnie unikać wykuwania otworów i zagłębień, co może prowadzić do uszkodzenia, a nawet zniszczenia zbrojenia konstrukcji.

Budynki elektrowni niskospadowych z turbozespołami pionowymi

Elektrownie z układem pionowym turbozespołów mają następujące zalety:

1. w razie konieczności zastosowania wysokości ujemnej ssania otrzymuje się łatwiejsze i tańsze rozwiązania budynku;
2. uzyskuje się najmniejszą powierzchnię budynku;
3. otrzymuje się najmniejszą rozpiętość suwnicy;
4. łatwy dostęp do wszystkich łożysk turbozespołu.

Wadą układu pionowego jest to, że w razie demontażu wirnika turbiny trzeba rozmontować cały turbozespoł, łącznie z wirnikiem generatora. Istnieją rozwiązania umożliwiające dostęp do wirnika oraz demontaż i montaż jego łopatek od dołu, ze spirali turbinowej.

Konstrukcję turbozespołu pionowego Kapłana doprowadzono drogą wieloletniej praktyki do ogromnej doskonałości, osiągając zwartość budowy, a jednocześnie bardzo łatwy dostęp do łożysk i

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok
innych części. W nowoczesnych konstrukcjach najmniejszą wysokość turbozespołu osiąga się
poprzez:

- umieszczenie łożyska wzdłużnego (nośnego) na pokrywie turbiny,
- zastosowanie wspornego wału turbiny i generatora osadzonego na dwóch łożyskach poprzecznych,
- umieszczenie serwomotoru łopatek wirnika w piaście generatora,
- doprowadzenie oleju do serwomotoru łopatek wirnika poprzez łożysko poprzeczne górne,
- zastosowanie wzbudnicy od wału za pomocą przekładni kątowej.

Taka konstrukcja pozwala zmniejszyć wysokość budynku. Budynki elektrowni mogą mieć hale
maszyn, w której znajdują się generatory z suwnicą jeżdżącą nad nimi oraz plac remontowy o
powierzchni równej zajmowanej przez jeden turbozespół (taka konstrukcja budynku nazywa się
halowa). W niektórych elektrowniach w hali widoczne są tylko wzbudnice, a generatory znajdują się
poniżej poziomu w podłogi hali. Konstrukcje budynku bez wysokiej hali maszyn nazywa się
bezhalową. Każdy generator jest bezpośrednio przykryty dachem zdejmowanym przy montażu i
demontażu. Dźwig portalowy jeżdżący obsługuje oprócz turbozespołów również zastawki wlotowe do
turbiny i zastawki rur ssących.

Powierzchnia stopy fundamentu budynku elektrowni wodnej powinna być uwarunkowana
wyłącznie wymogami stawianymi przez zainstalowanie turbin wodnych i żadne inne potrzeby nie
powinny wpłynąć na jej powiększenia. Należy dążyć przy projektowaniu do tego, aby rzędna stopy
fundamentu budynku była uwarunkowana wyłącznie względami budowlanymi, co jednak nie zawsze
daje się osiągnąć (szczególnie przy dużych średnicach wirników) ze względu na duże wartości
współczynnika kawitacji szybkobieżnych turbin Kaplana. Przy bardzo małych spadach i jeżeli warunki
kawitacyjne na to pozwalają, należy zainstalować turbiny w układzie lewarowym.

LITERATURA

Balcerski W. i inni (1969): Budownictwo betonowe. Tom XVII. Budowle wodne śródlądowe.

Arkady, Warszawa.

Lewandowski J.B (1996): Małe elektrownie wodne. Maszynopis Katedry Budownictwa Wodnego,

AR w Poznaniu.

Lewandowski J.B (1998): Wymiarowanie budowli metodą stanów granicznych. Maszynopis Katedry

Budownictwa Wodnego, AR w Poznaniu.

Michałowski S., Plutecki J. (1975): Energetyka wodna. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne,
Warszawa

PN-82/B-02000 Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości

dr inż. Paweł Zawadzki: BUDOWLE PIETRZĄCE – wybrane zagadnienia IV rok

PN-88/B-02014 Obciążenia budowli. Obciążenia gruntem

PN-76/B-03001 Konstrukcje i podłoża budowli. Ogólne zasady obliczeń

PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie

PN-B-03203/luty 2000 Konstrukcje stalowe. Zamknięcia hydrotechniczne. Projektowanie i wykonanie

ROZPORZĄDZENIE MINISTRA OCHRONY ŚRODOWISKA, ZASOBÓW NATURALNYCH I LEŚNICTWA z dnia 20 grudnia 1996 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie. (Dz. U. z 1997 r. Nr 21, poz. 111)

USTAWA z dnia 18 lipca 2001 r. **Prawo wodne.** (Dz. U. z dnia 11 października 2001 r.)