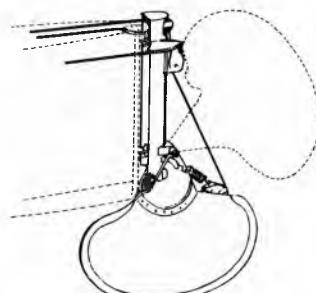
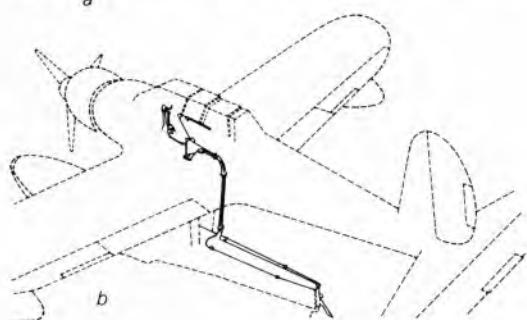
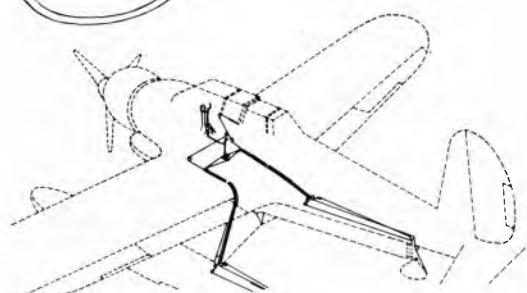


rešetkastog nosača sastavljenog od profiliranih štapova (sa žičnim zategama ili bez njih), ili u obliku jednog ili više profiliranih nosača mješovite ili ljskaste konstrukcije.

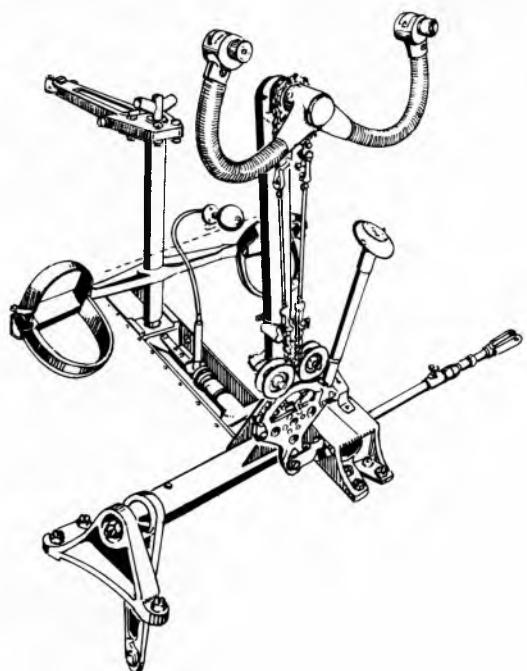
Ako je hidroavion predviđen za katapultiranje, na plovčima ili hidrotrupu treba postaviti okove za pričvršćenje na klizač (kolica) katapulta i kuku za otpuštanje.



Sl. 47. Izgled vodnog kormila na plovku jednomotornog hidroaviona



Sl. 48. Komande za upravljanje vodnim kormilom: a kod jednomotornog hidroaviona sa dva plovka, b s centralnim plovkom



Sl. 49. Komande leta s palicom za upravljanje vodnim kormilom

Na kraju plovaka i hidrotrupova jednomotornih hidroaviona postavlja se, radi lakšeg manevriranja na vodi, vodno kormilo kojim pilot upravlja iz kabine pomoću posebne komande, ili su vodovi vodnog kormila spojeni s nožnim komandama kormila pravca.

Za gradnju hidrotrupova i plovaka mogu se upotrijebiti drvo, lake legure i čelični lim. Drveni hidrotrupovi i plovi više se ne izrađuju zbog složnosti fabrikacije, hermetizacije i zaštite. Samo za izradbu plovaka lakih sportskih i turističkih hidroaviona ponekad se koriste drveni furniri (obično mahagoni) unakrsno ljepljeni vodootpornim sintetskim ljeplilima, a izvana zaštićeni armiranom umjetnom smolom. U novije vrijeme izrađuju se za luke hidroavione i plovi iz armirane umjetne smole ispunjeni krutom pjenastom masom (poliuretanska smola) što osigurava apsolutnu nepotonljivost. Lake aluminijске legure tipa Al-Cu-Mg (Duraluminij), koje se veoma mnogo upotrebljavaju u konstrukciji letjelica, nepogodne su za izradbu plovaka i hidrotrupova zbog neotpornosti na korozisko djelovanje morske vode. Najveću primjenu nalaze tzv. platirani limovi legure Al-Cu-Mg, koji se postupkom valjanja presvuku tankim slojem čistog aluminija (komercijalni nazivi Alclad, Albondur, Bondurplat i dr.; v. *Aluminij*, TE 1, str. 223). Najveću trajnost i otpornost pokazuju hidrotrupovi i plovi izrađeni od legiranog nerđajućeg čeličnog lima. Negativna osobina čeličnih hidrotrupova i plovaka jest njihova relativno velika težina.

LIT.: R. A. Saville-Sneath, *Aircraft of the United States*, Vol. 2 & 3, Penguin Books, Harmondsworth 1946. — M. Nenadović, *Osnovi aerodinamičkih konstrukcija*. Naučna knjiga, Beograd 1950. — K. Munson, *Aircraft of World War I*. Ian Allan, London 1967. — S. Milutinović, *Konstrukcija aviona*. Gradevinska knjiga, Beograd 1970. — Jane's all the World Aircraft. Jane's Yearbooks, London 1971–72, 1974–75. — Luftfahrt International. Publ. Arch. K. R. Pawlad, Nürnberg 1974–75.

N. Kršić

HIDROELEKTRANE (HE), postrojenja koja se grade na određenom potезу rijeke radi energetskog iskorišćavanja potencijalne energije vode (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547). Takvo postrojenje je sklop građevina i uređaja za usporavanje vode i regulaciju protoka (brane i akumulacije) te za dovod i odvod vode (kanali, tuneli, tlačne cijevi) i strojarnica sa strojevima kojima se potencijalna energija vode transformira u mehaničku (vodne turbine) a ta u električnu energiju (generatori).

U prirodnim uvjetima potencijalna i kinetička energija vode utroši se u koritu najvećim dijelom za svladavanje otpora trenja, za razaranje dna i obala, te za prijenos proizvoda toga razaranja. Energija dijela vodotoka ovisi o količini vode koja protjeće koritom (protok $Q \text{m}^3/\text{s}$) i o visinskoj razlici između dovoda i odvoda vode (pad $H \text{m}$).

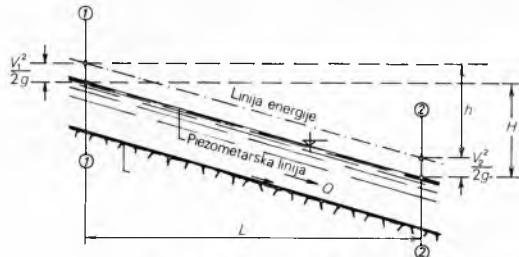
Na obalama gdje su razlike plime i oseke velike (zapadna obala Francuske, obala Velike Britanije, istočna obala Kanade i dr.) može se ta razlika iskoristiti hidroelektranama na plimu i oseku (v. *Elektrane*, TE 3, str. 558).

Poseban tip su pumpno-akumulacijske hidroelektrane (PAHE). Razlika razine vode stvara se tada pumpanjem vode iz donjeg u gornji bazen, obično u toku noći, kada elektrane koje proizvode temeljnu energiju imaju viška energije (v. *Elektrane*, TE 3, str. 558). Tako podignuta voda iskorištava se u razdoblju vršnog opterećenja za proizvodnju vrednije varijabilne energije. Razlika u vrijednosti tih energija čini taj pothvat rentabilnim iako se za pumpanje troši $\sim 40\%$ više energije nego što se može s istom vodom proizvesti.

Osnovni tipovi hidroelektrana. Prema smještaju strojarnice u odnosu na branu razlikuju se dva osnovna tipa: pribranska i derivacijska hidroelektrana.

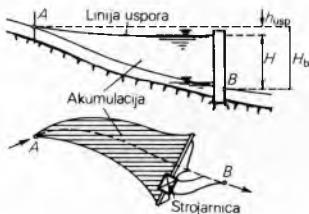
Najjednostavnije se podiže razina vode gradnjom brane i elektrane u koritu rijeke, gdje su obale dovoljno visoke. Ako su obale relativno niske, moraju se zaštititi nasipima uzduž korita, da se ne poplave velike površine zemljišta. Takva shema energetskog iskorištenja vodotoka odgovara *pribranskoj hidroelektrani*. Tada se sva energija toka ne utroši za svlađivanje

otpora trenja u koritu i za druge gubitke. Pad linije energije jest $I = \frac{v^2}{c^2 R}$, gdje je v m/s brzina u koritu, c koeficijent ovisan o hrapavosti korita a R hidraulički polumjer. Kako je ujedno nagib korita $I = \frac{H}{L}$, gdje je H m visinska razlika ili pad između početne i krajnje točke poteza koji se iskorištava a L m njihova međusobna udaljenost (sl. 1), proizlazi da je $H = \frac{v^2 L}{c^2 R}$, pa će prema tome gubitak pada biti to manji što je brzina manja.



Sl. 1. Pad prirodnog korita

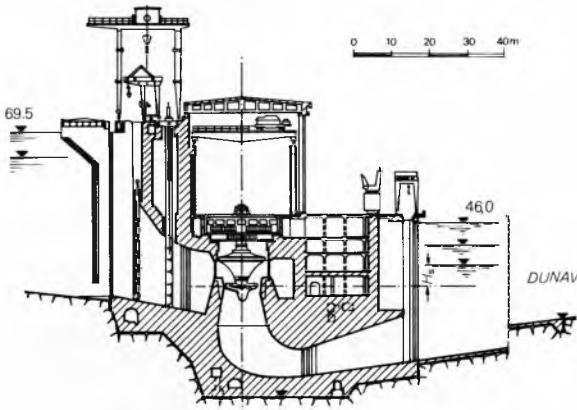
U prirodnom koritu sav pad H utroši se na gubitke h . Ako se gradi brana u koritu, poprečni presjek se povećava pa se brzina smanjuje. Također se povećava hidraulički polumjer jer se brže povećava površina presjeka kojim se voda kreće nego oplakivani obod (sl. 2). Zbog toga se samo dio raspoloživog pada utroši na gubitke h a veći dio ostaje za iskorištanje u hidroelektrani.



Sl. 2. Pribranska shema postrojenja riječnog tipa

Strojarnica u pribranskoj hidroelektrani može imati različite položaje. Ako se nalazi u sastavu objekta kojim se usporava voda, to je *rijecna hidroelektrana*, što je poseban tip pribranske hidroelektrane. Konstrukcija strojarnice preuzima tada pritisak vode kao dio brane. U normalnim okolnostima moguće je ostvariti stabilnost konstrukcije do uspora 25...30m. HE Đerdap na Dunavu (sl. 3) veliko je postrojenje takvog tipa. Poseban su tip riječnih hidroelektrana one na rijeci Dravi uzvodno od Maribora. Svaki agregat smješten je u poseban prošireni stup koji se nalazi između dva protočna polja za propuštanje velikih voda (v. Elektrane, TE3, str. 553).

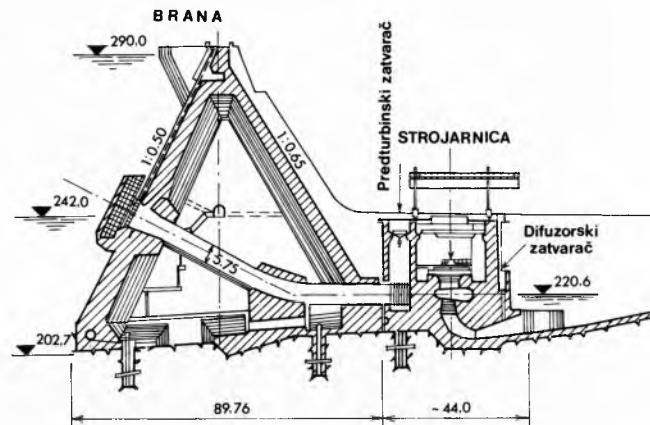
Ako je strojarnica odvojena od brane i nalazi se uz njenu nizvodnu nožicu, voda se dovodi do turbinu kroz tlačne cijevi



Sl. 3. Poprečni presjek kroz strojarnicu riječne HE Đerdap

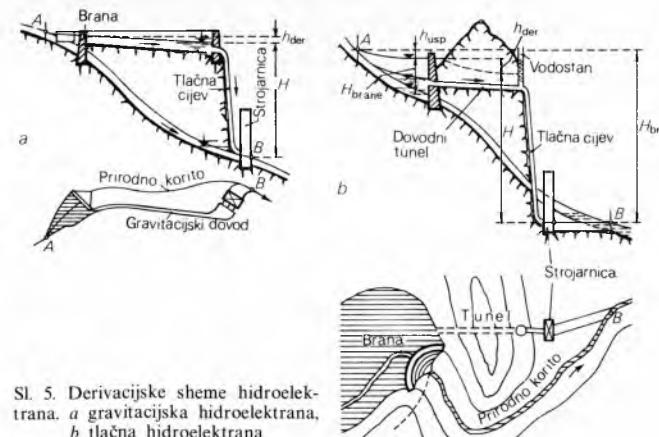
u tijelu brane. Veliki broj hidroelektrana takvog tipa ilustrira poprečni presjek kroz HE Bajina Bašta na Drini (sl. 4). Konstrukcija strojarnice ne preuzima tada pritisak vode pa prema tome ne ograničava visinu uspora.

U oba navedena slučaja ne može se iskorištavati cijeli raspoloživi pad poteza rijeke, jer se jedan njegov dio gubi zbog pojave linije uspora $H = H_{br} - h_{usp}$ (sl. 2).



Sl. 4. Poprečni presjek kroz pribransku HE Bajina Bašta na Drini

Derivacijske hidroelektrane (sl. 5) grade se u brdovitim predjelima ili u ravnici kad se samo gradnjom brane, a zbog nepovoljnih topografskih uvjeta, ne ostvaruje ekonomična koncentracija pada. Tada se voda dovodi hidroelektrani tunelom ili umjetnim koritom uz manje gubitke nego u prirodnom koritu. Derivacijske hidroelektrane mogu biti *gravitacijske* i *tlačne*. U njima se najveći dio koncentracije pada postiže derivacijskim objektima (tunelima, kanalima), a samo manji branama. Kad se znatan dio pada ostvaruje branom, govori se o kombiniranoj hidroelektrani (kombinacija pribranske i derivacijske hidroelektrane). Takva je HE Rama u sливу Nerete; branom se postiže pad od 100m, a ukupni je pad 325m.



Sl. 5. Derivacijske sheme hidroelektrana. a) gravitacijska hidroelektrana, b) tlačna hidroelektrana

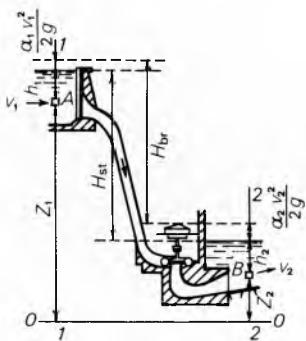
U gravitacijskoj elektrani voda se dovodi turbinama kanalom ili gravitacijskim tunelom. Iz strojarnice se voda vraća u korito rijeke odvodnim kanalom. Nekoliko hidroelektrana takvog tipa izgrađeno je na Dravi nizvodno od Maribora (dovod kanalom), a takve su HE Kraljevac na Cetini i HE Manojlovac na Krki (dovod tunelom).

Klasifikacija hidroelektrana. Hidroelektrane se mogu klasificirati: a) prema padu: *niskotlačne* i *visokotlačne* hidroelektrane. Visokotlačne iskorištavaju pad veći od 50m, a mogu biti pribranske, derivacijske ili kombinirane. Riječne hidroelektrane uvjek su niskotlačne, a one mogu biti i pribranske i derivacijske; b) prema smještaju: *nadzemne* i *podzemne* već prema smještaju strojarnice; c) prema mogućnosti regulacije protoka: *protočne* i *akumulacijske*. U protočnim hidroelektranama volumen je vode iza brane tako mali da se njime ne može utjecati na režim

otjecanja vode. Akumulacijske hidroelektrane mogu imati akumulacijski bazen za tjednu, sezonsku, godišnju ili višegodišnju regulaciju protoka. Tako se npr. bazenom za sezonsku regulaciju može voda koja dojeće u bazu u kışnoj sezoni tamo sačuvati i iskoristiti u sušnom razdoblju; d) prema ulozi u elektroenergetskom sistemu: *temeljne i vršne* (v. Elektrane, TE3, str. 547). Temeljne su kad proizvode gotovo samo konstantnu energiju u toku dana i godine te pokrivaju temeljni dio dijagrama opterećenja, a vršne kad se najveći dio proizvodnje iskoristiava za pokrivanje najvišeg dijela dijagrama opterećenja.

Danas se grade svi tipovi hidroelektrana, jer su takvi prirodni uvjeti i potrebe. Međutim, s obzirom na sve manji udio proizvodnje hidroenergije u ukupnoj proizvodnji električne energije, sve više vrijede one hidroelektrane koje mogu proizvoditi što više varijabilne energije. Tamo gdje postoji stalni višak energije, vršna se energija može proizvesti gradnjom pumpno-akumulacijskih hidroelektrana.

Snaga i energija hidroelektrane. Energija i snaga hidroelektrane može se izračunati na osnovi razmatranja kretanja vode u hidroelektrani od gornje do donje vode (sl. 6). Masa vode volumena V , kojoj je težište u točki A presjeka 1–1 gornje vode, protječe kroz vrijeme t s protokom $Q \text{ m}^3/\text{s}$ kroz turbinu, i stiže u B presjeka 2–2 donje vode. Pri tome se gubi energija pretvarajući potencijalnu energiju vode u električnu. Gubici su proporcionalni $Q(1 - \eta_{\text{HE}})$, gdje je η_{HE} stupanj djelovanja hidroelektrane.



Sl. 6. Određivanje pada hidroelektrane

Prema Bernouillijevoj jednadžbi (v. *Mehanika fluida*) dobiva se

$$W_{\text{HE}} = g \left[(Z_1 - Z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2} \right] V Q \eta_{\text{HE}}, \quad (1)$$

gdje su Z_1 i Z_2 visina težišta A i B računajući od razine 0–0, p_1 i p_2 tlakovi u težištima, ρ je gustoća vode, v_1 i v_2 su brzine vode u težištima, a V je volumen vode koja protječe. Omjeri p_1/ρ i p_2/ρ jesu visine tlaka h_1 i h_2 , pa su $H_1 = Z_1 + h_1$ i $H_2 = Z_2 + h_2$ visine gornje i donje razine iznad razine 0–0. Razlika $Z_1 - Z_2$ je statički tlak H_{st} u hidroelektrani. Za reakcijske se turbine (v. *Vodne turbine*) dobiva

$$W_{\text{HE}} = g \left(H_{\text{st}} + \frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2} \right) V Q \eta_{\text{HE}}. \quad (2)$$

Izraz je u zgradama bruto pad (H_{br}) hidroelektrane. U stupanj djelovanje η_{HE} uključeni su svi gubici u hidroelektrani. Gubici u zahvatu, dovodu i odvodu mogu se prikazati kao gubici pada (Σh_g), a stupnjem djelovanja η_t obuhvaćeni su gubici u turbinu i generatoru, pa se (2) može napisati u obliku

$$W_{\text{HE}} = g(H_{\text{br}} - \Sigma h_g) V Q \eta_t. \quad (3)$$

Izraz u zgradama jednak je neto padu H_n hidroelektrane, pa je

$$W_{\text{HE}} = g H_n V Q \eta_t. \quad (4)$$

Energija u (4) dobiva se u Ws ($\text{kgm}^2 \text{s}^{-2}$). Ako se, međutim, podijeli sa brojem sekunda kroz koje vrijeme voda protječe kroz turbine, dobiva se

$$P_{\text{HE}} = g H_n Q \rho \eta_t, \quad (5)$$

gdje je $Q \text{ m}^3/\text{s}$ srednji protok kroz turbine, a P_{HE} srednja

snaga u W . Za gustoću vode može se s dovoljnom točnošću postaviti $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, pa je

$$P_{\text{HE}} = 9,81 H_n Q \eta_t \quad \text{kW}. \quad (6)$$

Može se računati da je prosječno $\eta_t = 0,87$, pa se za približne proračune upotrebljava formula

$$P_{\text{HE}} \approx 8,5 H_n Q \quad \text{kW}. \quad (7)$$

S obzirom da je protok u rijekama vrlo promjenljiv, hidroelektrane se grade za ograničenu propusnu moć dovodnih organa i turbina izračunatu posebnim energetsko-ekonomskim analizama. Najveći protok koji se može iskoristiti u turbinama nazvan je *instaliranim protokom* (ili veličinom gradnje) Q_i . Kako je instalirani protok obično manji od maksimalnog, pri velikim vodama preljeva se neiskorištena voda preko brane i sva se energija vodotoka ne iskoristiava. Da bi se smanjili ili izbjegli preljevi, grade se akumulacijski bazeni. Oni zadržavaju vodu pri velikim protocima a ona se iskoristiava u elektranama za vrijeme suše. Da bi se odredili svi parametri mjerodavni za određivanje propusne moći objekata i turbina, potrebno je proučiti hidrološki režim rijeke za proteklih 30–40 godina, jer su rasporedi protoka unutar godine i srednji godišnji protoci znatno ovisni o vlažnosti godine. Ako se srednji protok za dugogodišnji niz godina označi sa Q_{sr} , instalirani protok pojedinih tipova hidroelektrana iznosi za protočne i derivacijske hidroelektrane $1,5 Q_{\text{sr}} < Q_i < 2,5 Q_{\text{sr}}$, a za akumulacijske i vršne hidroelektrane $2 Q_{\text{sr}} < Q_i < 4 Q_{\text{sr}}$.

U vrlo razvijenim zemljama vršne hidroelektrane imaju već i znatno veće instalirane protote.

Moguća godišnja proizvodnja hidroelektrane izračunava se pomoću relacije (7), a prema

$$W = 8,5 \sum_n Q_n H_n t_n, \quad (8)$$

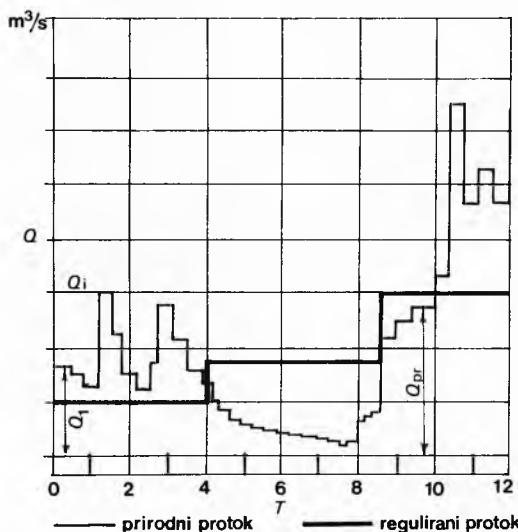
u kojoj su Q_n i H_n srednji protok i srednji neto pad u vremenskom razdoblju od t_n sati. Godina se može podjeliti na sedmice,

Tablica 1

POSTOJEĆE I BUDUĆE NAJVJEĆE HIDROELEKTRANE NA SVIJETU

Ime	Zemlja	Instalirana snaga		Početak pogona
		sadašnja MW	konačna MW	
Itaipu	Brazil	—	12600	gradi se
Grand Coulee	SAD	2761	9780	1941
Paulo Alfonso	Brazil	1299	6774	1955
Guri	Venezuela	524	6500	1967
Tucurni	Brazil	—	6480	gradi se
Sajanska	SSSR	—	6400	gradi se
Krasnojarska	SSSR	6096	6096	1968
La Grande	Kanada	—	5416	1979
Churchill Falls	Kanada	5225	5225	1971
Bratska	SSSR	4100	4600	1964
Ust-Ipimska	SSSR	720	4320	1974
Ulha Solteira	Brazil	3200	4100	1973
Cabora Bassa	Mozambik	2000	4000	1975
John Day	SAD	2160	2700	1968
Volgogradска	SSSR	2560	2560	1958
Chicoasen	Meksiko	—	2400	1978
Kujbiševska	SSSR	2300	2300	1955
C. Bennet	Kanada	1816	2270	1969
Đerdap	Jugoslavija—Rumunjska	2050	2050	1971

dekade ili mjesecce (sl. 7). Padovi H_n u pojedinim razdobljima mogu biti različiti, jer se sa Q_n mijenjaju gubici, a mijenja se i razina gornje vode kad se iskorištava akumulacijski bazen za regulaciju protoka.

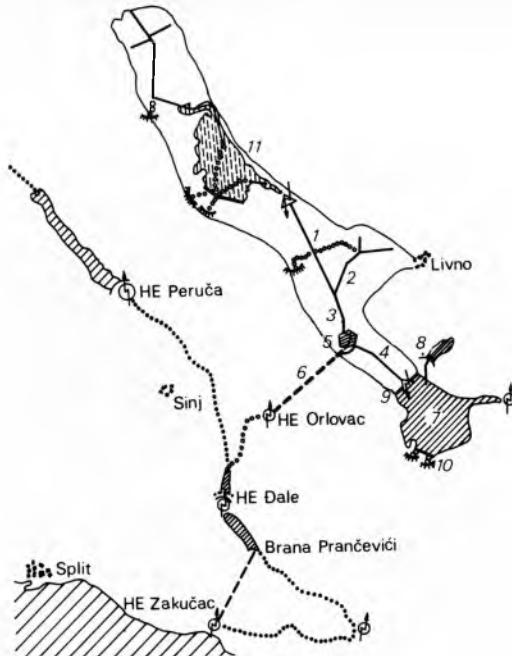


Sl. 7. Srednji prirodniji dekadni protoci i regulirani protoci kad postoji akumulacija

Kad se govori o mogućoj proizvodnji hidroelektrana, obično se misli na srednju godišnju proizvodnju iz niza godina.

Vodoprivredni sustavi. Način gradnje hidroelektrane ovisi o prirodnim uvjetima. One se razlikuju od ostalih tipova energetskih postrojenja, u kojima se praktički svi parametri mogu slobodno odabrati. Ako se, dakle, želi graditi akumulacijski bazen (umjetno jezero velikog volumena) kao dio neke hidroelektrane ili vodoprivrednog sustava, to se ne može učiniti na onom mjestu gdje za to nema prirodnih uvjeta.

Kad je započelo iskorištavanje energije vodotoka za proizvodnju električne energije (prije 70...80 godina), gradile su se

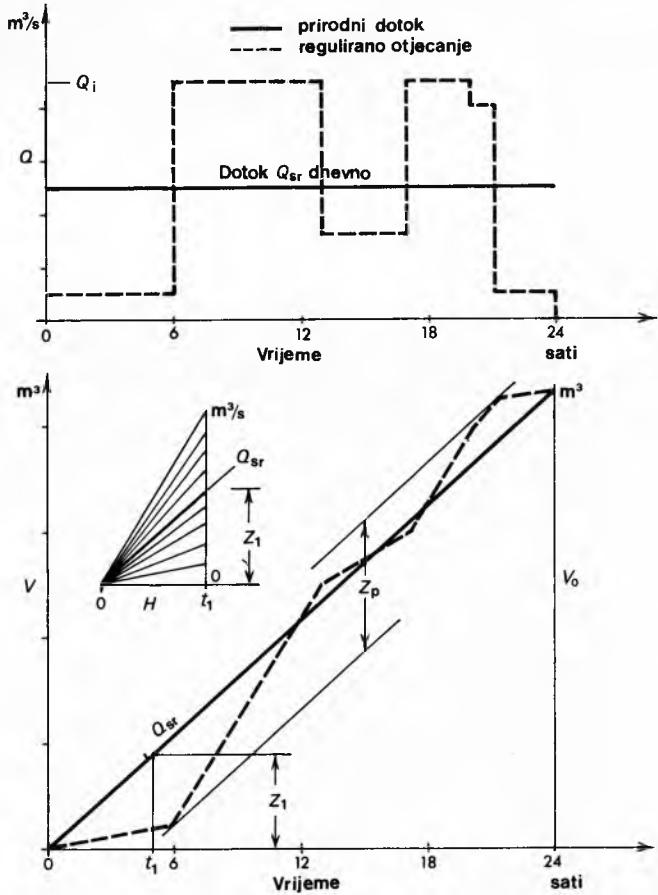


Sl. 8. Hidroenergetski sustav Cetine. 1 kanal Plovuča—Brda, 2 kanal Brda—Lipa, 3 kanal Brda—Lipa, 4 reverzibilni kanal Lipa—Buško Blato, 5 bazen Lipa za dnevnu regulaciju, 6 dovodi tunel Lipa—Ruda, 7 akumulacija Buško Blato 800 hm^3 , 8 mala akumulacija na bujici Mandak, 9 brana i reverzibilna pumpna stanica — elektrana Podgradina, 10 brana Kaganac koja odvaja ponorske zone, 11 II etapa gradnje s retencijom Čaprazlje

hidroelektrane na povoljnem dijelu vodotoka nastojeći pronaći optimalno rješenje za tu hidroelektranu bez energetskog iskorištenja ostalih dijelova vodotoka i potrebe drugih korisnika voda (natapanje, vodoopskrba). Kasnije je, međutim, shvaćeno da se hidroelektrane moraju uklopiti u vodoprivredni sustav, što znači da se mora proučiti upotreba vodâ na cijeloj duljini vodotoka i tražiti optimalno rješenje za energetiku i druge privredne grane (poljoprivreda, industrija, vodoopskrba, turizam), za zaštitu od poplava i za zaštitu okoline. Smatra se da nema racionalnog iskorištenja vode i zaštite od nje, ako se ne grade hidroenergetska postrojenja, jer proizvodnja električne energije čini svaki zahvat na vodotoku rentabilnijim. Takvom gradnjom ostvaruju se, naime, akumulacijski bazeni kojima se poboljšava vodni režim, što omogućuje racionalno iskorištenje vodâ smanjujući velike a povećavajući male vode. Akumulacijama se, međutim, može smanjiti ljetni temperaturni razpon vode za nekoliko stupnjeva, što može nepovoljno utjecati na biljne i životinske zajednice u vodotoku. Način eksploatacije akumulacija ovisi o potrebama svih korisnika voda, a ublaženje velikih oscilacija protoka pri vršnom radu hidroelektrana postiže se kompenzacijским bazenima i eksploatacijom posljednje hidroelektrane u lancu kao temeljne elektrane.

Primjer takvog racionalnog poduhvata je gradnja HE Orlovac u sливу Cetine (sl. 8). Voda se sakuplja sustavom kanala na Livanskom polju i dovodi se u akumulaciju Buško Blato. Time se osigurava polje od poplava, voda za navodnjavanje i druge potrebe. Tunelom se dovodi voda do strojarnice HE Orlovac iskorištavajući raspolaživi vodni potencijal na padu od 400m. Voda se zatim dovodi u Cetinu i HE Zakučac u kojoj se ponovno iskorištava na padu nešto manjem od 300m.

Regulacija protoka. Dnevna regulacija potrebna je radi što veće varijabilne energije u toku dana. Kako je dotok u toku dana približno konstantan a potrošnja vode promjenljiva, mora se voda akumulirati za vrijeme noćnog a i poslijepodnevnog malog opterećenja. To povećava iskoristivi protok kroz turbine u doba vršnog opterećenja (sl. 9). Na osnovi ispitivanja za



Sl. 9. Dnevna regulacija protoka

HIDROELEKTRANE

mnoge hidroelektrane, potrebnji je volumen bazena za dnevnu regulaciju 5...20% od ukupnog volumena vode koji maksimalno može proteći kroz turbine u toku dana. Potrebnji je volumen bazena za dnevnu regulaciju ($Z_{p,d} \text{ m}^3$), dakle,

$$4000Q_i < Z_{p,d} < 17000Q_i. \quad (9)$$

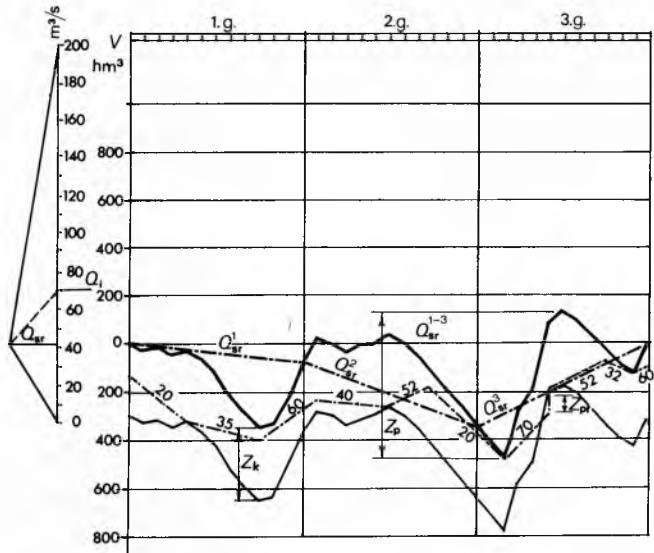
Toliki volumen bazena, ako se u nizu nalazi više protočnih hidroelektrana, potreban je za posljednju, da bi se ispuštao u rijeku što ravnomjerniji protok a da to ne utječe na rad uzvodnih hidroelektrana. Taj bazen radi kao kompenzacijski bazen. Potrebnji volumen bazena Z_p utvrđuje se pomoću sumarnih krivulja dotoka u bazen i protoka kroz turbine (donji dio sl. 9). Potrebnji volumen bazena Z_p bit će manji ako se opterećenje smanji u podnevnim satima. U praksi nije uvijek moguće toliki korisni volumen, pa se tada može ostvariti samo djelomična dnevna regulacija protoka.

Zbog rasporeda radnog vremena u toku tjedna potrošnja je energije u neradnim danima manja. Da se voda sačuva za povećanje protoka u radnim danima, grade se, kad je to moguće, bazeni za tjednu regulaciju protoka ako na vodotoku nema većih akumulacija. Potrebnji volumen određuje se kao za dnevnu regulaciju. Tada se radi sa sumarnom krivuljom dotoka i protoka kroz 7 dana. Najveći razmak među njima određuje potrebnji volumen za tjednu regulaciju ($Z_{p,t} \text{ m}^3$). Taj volumen iznosi

$$25000Q_i < Z_{p,t} < 100000Q_i. \quad (10)$$

Iako je važna mogućnost dnevne i tjedne regulacije, za racionalnije iskorištavanje vodâ veće značenje ima godišnja i višegodišnja regulacija protoka. To je potrebno zbog ljetnog i zimskog, relativno, sušnog razdoblja. Takva regulacija protoka postiže se akumulacijama kojima je volumen 25...100% od srednjeg godišnjeg volumena dotoka u profilu brane. Višegodišnja regulacija postiže se kad je volumen akumulacije najmanje 70% od godišnjeg volumena. Ako je volumen manji od 25% tog volumena ne može se postići potpuna godišnja nego samo nepotpuna godišnja ili sezonska regulacija. U nas su male mogućnosti za ostvarenje akumulacija za godišnju regulaciju na većim rijeckama. Akumulacije za godišnju regulaciju imaju HE Rama (466 hm^3 ; $1 \text{ hm}^3 = 10^6 \text{ m}^3$), hidroelektrane na Trebišnjici (110 hm^3), HE Piva (800 hm^3) a za višegodišnju regulaciju HE Orlovac (800 hm^3), HE Mavrovo (274 hm^3) i dr. Jadranske rijeke zbog jače izraženog bujičnog režima traže veće volumene za godišnju regulaciju protoka (~40% od srednjeg godišnjeg protoka), a crnomorske manje (~25%), jer imaju ujednačeniji režim protoka.

Potrebnji volumen akumulacija određuje se sumarnom krivuljom protoka za višegodišnje razdoblje. Povoljnije je takve krivulje crtati u kosokutnom koordinatnom sustavu (sl. 10), u kojem je srednji protok apscisna os. U mjerilu koje vrijedi za ordinatu,



Sl. 10. Višegodišnja regulacija protoka

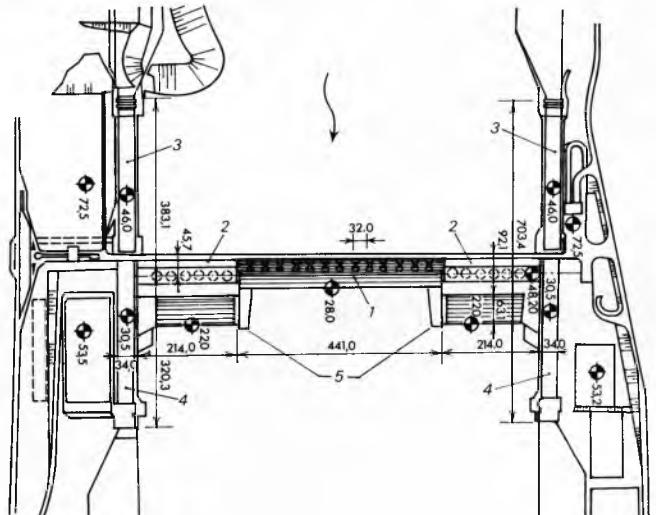
Z_p je potrebnji volumen za regulaciju protoka u promatranom razdoblju. Budući da je stvarni volumen akumulacije Z_k (sl. 10) manji od potrebnog, ne može se potpuno regulirati otjecanje iz bazena. Da bi se utvrdio mogući pogonski plan akumulacije, u nas se upotrebljava metoda prema kojoj se tražilo da bazen bude pun 1. juna a da se 1. oktobra u njemu nalazi volumen vode koji je jednak 20% od volumena bazena. To se zahtijeva radi sigurnosti, ako se produži sušno razdoblje. Raspoloživa voda može se iskorištavati samo do instaliranog protoka a višak vode preljeće se ako ga bazen ne može prihvati.

Kolika je akumulacija rentabilna nije ipak moguće utvrditi na jednostavan način. Ako postoje povoljni prirodni uvjeti, utvrđuju se troškovi za nekoliko volumena akumulacije i isputuje se njihov utjecaj na troškove u elektroenergetskom sistemu. Zbog toga postoje i druge metode iskorištavanja akumulacijskih bazena prema kriteriju što ravnomjernije proizvodnje termoelektrana, metoda graničnih stanja i minimalnih troškova u elektroenergetskom sistemu. Elektronička računala danas omogućavaju primjenu sve složenijih postupaka i utvrđivanje utjecaja pojedinih postrojenja na troškove u sistemu u dovoljno dalekoj budućnosti. Nedostatak je svih tih postupaka u tome što se cijeli rad osniva na mnogo pretpostavljenih ulaznih podataka.

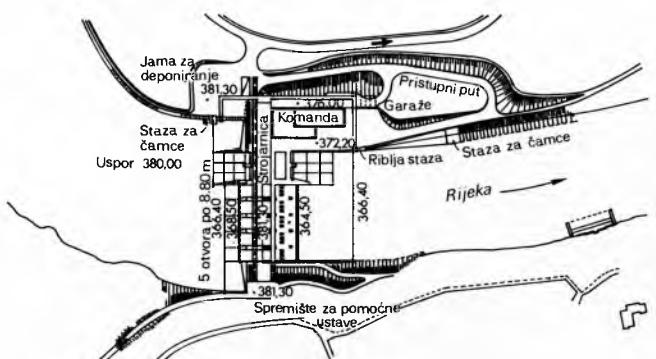
NISKOTLAČNE HIDROELEKTRANE

Niskotlačne hidroelektrane jesu riječne, pribranske i derivacijske na padu manjem od 50 m.

Riječna hidroelektrana. Osnovna je dispozicija moguća u više varijanata. U jednoj, strojarnice mogu biti na svakoj obali, što je karakteristično za granične rijeke (slučaj HE Đerdap, sl. 11), ili jedna strojarnica uz jednu od obala, gdje je pristup pogodniji (sl. 12). Brana s protočnim poljima za propuštanje velikih voda nalazi se, dakle, u sredini ili uz jednu obalu. Iz hidrauličkih razloga povoljniji je središnji položaj protočnih polja,

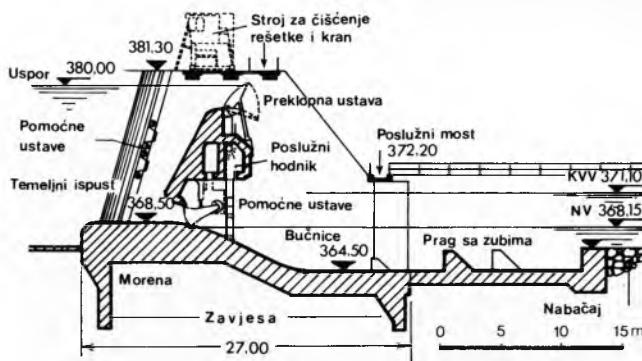


Sl. 11. Dispozicija HE Đerdap na Dunavu. 1 preljevna polja sa slapištem, 2 strojarnice, 3 i 4 komore brodskih prevodnika, 5 razdjelni zid



Sl. 12. Dispozicija riječne HE Bremgarten-Zufikon

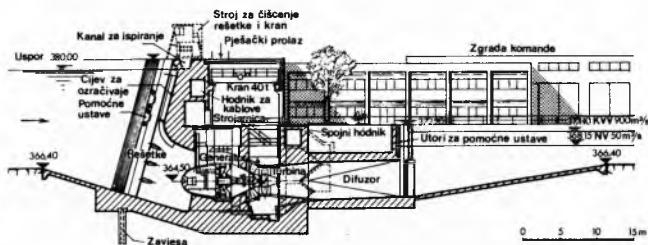
a iz pogonskih razloga je bolje ako su svi agregati u jednoj strojarnici. Ako je rijeka plovna, u sklopu je brane i prevodnica za prolaz brodova. Predio strojarnice odvojen je od protočnih polja razdjelnim zidom. Na izlazu iz turbine voda oteće praktički bez vrtloga koji se pojavljuju nizvodno od protočnih polja. Ta se dva strujanja (prelev i voda iz turbine) moraju odvojiti na potreboj duljini, koja se može približno izračunati a točnije odrediti modelskim ispitivanjem. Broj i dimenzije protočnih polja ovise o 1000-godišnjoj velikoj vodi (v. *Hidrologija*), koju treba preko njih propustiti, i o tipu ustava (zapornica). Obično se grade podizne ustave s otvorima do dna korita da bi se omogućio transport nanosa. Ako nije potreban otvor pune visine, na dnu se postavlja potopljeni prelev (ispust) s ustavom za podizanje a u gornjem dijelu preklopna ustava (zaklopka) (sl. 13). Tako je moguće propuštaći i nakupine na površini jezera, koje tamo trunu i šire zadah. Ako je bazen dug, ispiranje nanosa ne može biti djelotvorno. Voda koja se prelije kroz protočno polje ima kinetičku energiju pa nizvodno od prelevnog praga treba graditi bučnicu dovoljne dubine radi rasipanja energije. Potreba dubina i duljina bučnice određuje se računski ili pomoću modela. Bučnica štiti branu od podlokovanja koje bi izazvao voden skok (v. *Brane*, TE2, str. 124).



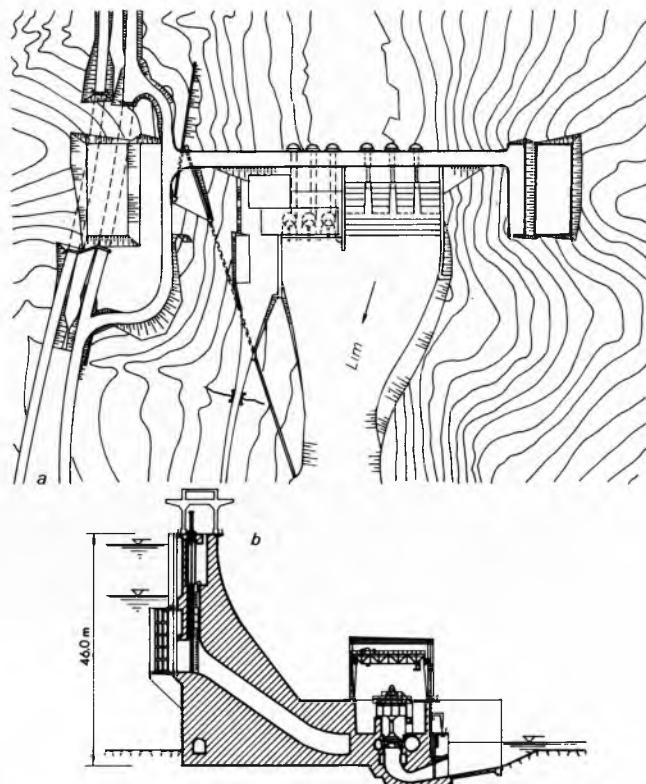
Sl. 13. Presjek kroz protočno polje HE Bremgarten-Zufikon na rijeci Reuss u Švicarskoj

Posebna je dispozicija primijenjena u hidroelektranama na Dravi i drugim nekim rijekama smještajem svake turbine u posebni stup a protočna se polja nalaze između stupova. Nedostatak je takve dispozicije da su agregati odvojeni, a prednost je raniji početak proizvodnje energije, tj. čim se izgradi dio postrojenja na jednoj obali. U elektrane ovog tipa ugrađuju se Kaplanove ili cijevne turbine (do 15m pada). Ugradnjom cijevnih turbina (sl. 14) omogućuje se pliće ukopavanje strojarnice. Cijevne turbine grade se do promjera od 9,0m i za snagu do 50 MW.

Pribranska hidroelektrana. Kada je visina uspora veća od 25...30m, zgrada strojarnice mora se odvojiti i postaviti uz nožicu brane. Opća je dispozicija kao u rječnim hidroelektranama, ali se izvodi i strojarnica u sredini korita. Turbine su Kaplanove ili Francisove. Ekonomičnije su Kaplanove za padove do 50m. Svaka turbina ima dovodnu cijev kroz tijelo brane sa zahvatom na užvodnoj strani brane. Upotrebljavaju se dvije različite dispozicije, kao npr.: HE Potpeć na Limu (sl. 15) i HE Grabovica na Neretvi (u gradnji) (sl. 16). HE Potpeć je pribranska hidroelektrana s prelevima preko krune brane i slapištem, a u HE



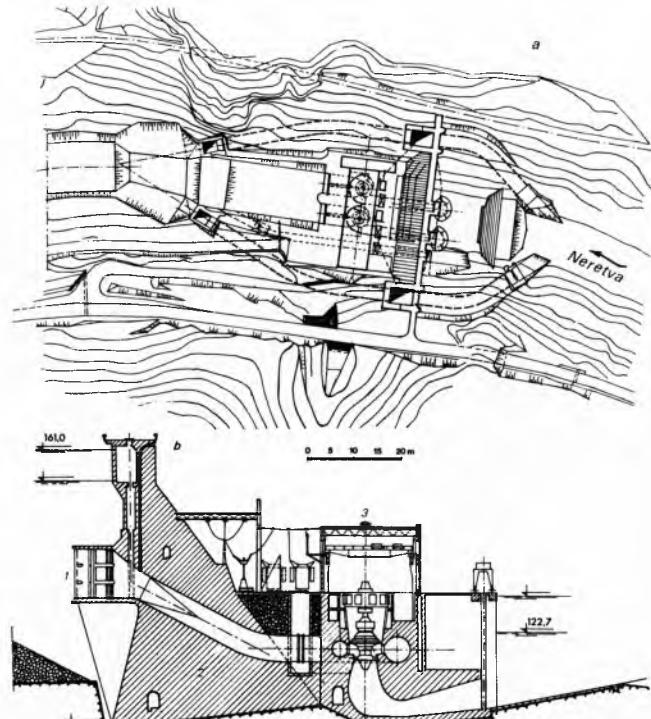
Sl. 14. Situacija i presjek kroz strojarnicu rječne HE Bremgarten-Zufikon s cijevnom turbinom. $Q_1 = 2 \times 100 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, $P = 2 \times 9050 \text{ kW}$ pri $H = 10,9 \text{ m}$, $W_{sr} = 100 \text{ GWh}$



Sl. 15. Dispozicija pribranske HE Potpeć na Limu. a situacija, b poprečni presjek kroz branu i strojarnicu

Grabovica prelev je na obalama s obilaznim tunelima, kojima se odvodi voda i za vrijeme gradnje. U sličnim topografskim uvjetima jedno su se vrijeme češće izvodili prelevi preko krova strojarnice u obliku skijaškog skoka (v. *Brane*, TE2, str. 124). Takvo rješenje nije svršishodno jer se čestice vode raspršuju pa padaju na električne aparate u rasklopnom postrojenju, što je štetno.

Dovodne tlačne cijevi imaju zatvarač na ulazu a predturbinski zatvarač može se ispustiti. Cijevi su od čeličnog lima i ubetonirane



Sl. 16. Dispozicija pribranske HE Grabovica na Neretvi (u gradnji). a situacija, b poprečni presjek kroz branu i strojarnicu

HIDROELEKTRANE

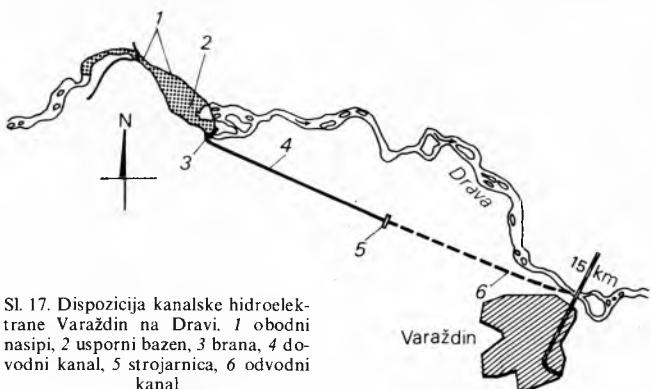
neposredno u tijelo brane. Budući da je beton masivnih brana podijeljen u blokove radi hlađenja pri betoniranju, njihov raspored treba prilagoditi razmaku cijevi, da cijev bude približno u sredini bloka.

Ustave su na preljevnim poljima podizne ili preklopne. Ako su podiznog tipa, treba barem na jednom polju predvidjeti i preklopni nastavak radi čišćenja površine jezera od nečistoća. Elektrane toga tipa moraju imati i ispust u dnu brane najmanje tolikog kapaciteta da se njime mogu opskrbiti svi nizvodni korisnici vode i za pražnjenje jezera. Ako je potrebno, takav ispust mora imati pomoćni zatvarač na ulazu i regulacijski na kraju. Da se zatvarač ne zaglavi, na ulazu se postavljaju rešetke.

U riječnim i pribranskim hidroelektranama često strojarnica nema punu visinu, jer bi zgrada zbog velike visine suviše odskakala od brane. Tada se na stropu strojarnice nalaze veliki montažni otvori a oprema se prenosi velikom portalnom dizalicom koja, kada nije u upotrebi, stoji uz obalu.

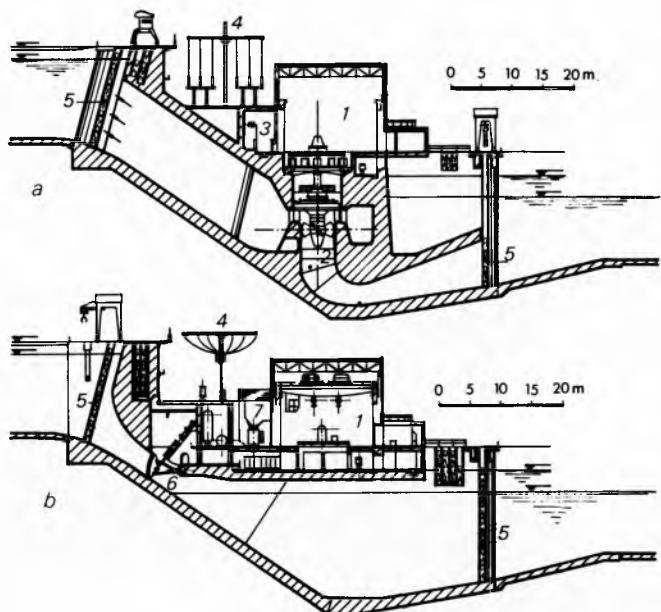
Derivacijska hidroelektrana. U grupu niskotlačnih derivacijskih hidroelektrana svrstavaju se jedino one gravitacijskog tipa. Tlačne derivacijske niskotlačne hidroelektrane imaju sve osobine visokotlačnih.

Gravitacijske hidroelektrane imaju obično višestruku namjenu u srednjem i donjem toku rijeka gdje su padovi manji. Branama se ne može postići veća koncentracija pada zbog potrebe gradnje dugih nasipa uzkorito pa se isti cilj može postići gradnjom dovodnog i odvodnog kanala. Tako se mogu iskorištavati relativno dugi potezi rijeke u jednoj stepenici a plovidba je velikim dovodnim i odvodnim kanalima lakša i jestinija nego prirodnim koritom. Tako je sagradeno više postrojenja takvog tipa na Rajni.



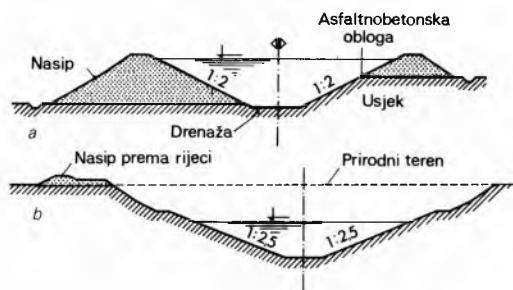
Sl. 17. Dispozicija kanalske hidroelektrane Varaždin na Dravi. 1 obodni nasipi, 2 usporni bazen, 3 brana, 4 dovodni kanal, 5 strojarnica, 6 odvodni kanal

U nas se takva postrojenja grade na Dravi nizvodno od Marijbora. Dva su u pogonu, a dva se grade (tabl. 2). Primjer normalne dispozicije jest HE Varaždin (sl. 17 i 18). U koritu rijeke gradi se zaustava (brana manje visine, s nasipima ili bez njih manje duljine uzduž uzvodnih obala) kojom se voda skreće u ulazni uredaj dovodnog kanala. Brana se sastoji od betonskog dijela s ustavama za propuštanje velikih voda kojima se obično automatski regulira visina uspora, a ako je profil širi, zatvara se prema obalama nasipom. Ako je podloga propusna, treba sprječiti veliku filtraciju ispod nasipa (dijaphragma, zavjesa, zagat). Rentabilna duljina dovoda i odvoda ovisi o nagibu korita i rijetko će se isplatiti takva gradnja ako je nagib manji od 2% . Omjer duljine dovodnog i odvodnog kanala i položaj strojarnice ovisi o topografskim i geološkim uvjetima. Dovodni kanal zahtijeva viši položaj pa se on izvodi u riječnim terasama koje su obično nešto odmaknute od korita. Nastoji se da kanal bude poluukopan, da bi se izjednačile mase iskopa i nasipa. To se uvjek ne može postići pa se tada dijelovi kanala nalaze samo u usjeku ili na nasipu. Strojarnica se smješta na mjestu gdje postoji neka prirodna stepenica u terenu. Tu je odvodni kanal obično dublje ukopan, i to na cijeloj duljini, a duljina obaju kanala može biti velika (u HE Varaždin 15 km). Prag ulaznog uređaja nešto je izdignut iznad dna korita da se sprječi unošenje vučenog nanosa u kanal. Ako se otvaranjem ustava na brani ne može spustiti razina vode ispod dna ulaznog lijevka, na ulazu u kanal moraju se postaviti ustave radi kontrole



Sl. 18. Hidroelektrana Varaždin. a poprečni presjek kroz strojarnicu, b poprečni presjek kroz sinhroni ispust (regulator protoka); 1 strojarnica, 2 Kaplovna turbina, 3 rasklopno postrojenje 35 kV, 4 rasklopno postrojenje 110 kV, 5 gredne zapornice, 6 segmentni zatvarač, 7 transformator

stanja kanala i radova u njemu. Ulazni se lijevak oblikuje uz osiguranje strujanja bez vrtloga, a ulazna brzina ne bi trebala biti veća od $1 \dots 1,5$ m/s. I dovodni i odvodni kanal obično imaju trapezni poprečni presjek (sl. 19), jer je on najbliži hidraulički najpovoljnijem polukružnom presjeku. Nagib kosina ovisi o geomehaničkim svojstvima materijala u kojemu se gradi. On obično iznosi $1 : 1,5 \dots 1 : 2,5$. Optimalna brzina određuje se proračunom ekonomičnosti, a dobivaju se vrijednosti $2,0 \dots 3,0$ m/s. Cijeli se dovodni kanal obično oblaže da bude što manja hravapost za cijeli vijek trajanja kanala i da se gubici vode iz kanala što više smanje. Oblaže se armiranim betonom male debljine ($6 \dots 10$ cm) ili asfaltnim betonom (debljine $10 \dots 15$ cm) s dva sloja od kojih je gornji vodonepropustan. Slojevi obloge nanose se kontinuirano, bez spojnica. U dijelovima kanala koji je potpuno ili djelomično ukopan mora se ispod obloge izvesti drenažu u sredini ili sa strane. Njen je zadatak da pri praznom kanalu sprečava izdizanje obloge zbog uzgona. Drenažu je od plastičnih cijevi s narezima. One su na pojedinim mjestima spojene s dnem kanala ventilima koji sprečavaju otjecanje vode iz kanala u drenažu a dopuštaju već pri malom tlaku dotjecanje vode u kanal. Voda koja se procjeđuje kroz nasipe kanala hvata se posebnim drenažnim kanalima uz vanjsku nožicu nasipa. Njihovom dubinom regulira se razina podzemne vode u okolini kanala.



Sl. 19. Karakteristični presjeci dovodnog (a) i odvodnog (b) kanala

Cijeli profil odvodnog kanala nije uvjek potrebno oblagati, nego samo u području oscilacija razine vode koja se mijenja s opterećenjem elektrane. Tako se osigurava stabilnost kosina pri naglim promjenama vodostaja u kanalu.

Cvor strojarnice mora biti tako izведен da se omogući rad elektrane, prolaz brodova ako su kanali plovni i ispuštanje

vode iz dovodnog u odvodni kanal kad elektrana ne radi. Obično se to postiže proširenjem kanala uz strojarnicu. S obzirom na padove upotrebljavaju se Kaplanove turbine. Kad se smanji op-

terećenje zbog rasterećenja u mreži, voda se mora istodobno propustiti kroz posebne sinhrone ispuste (sl. 18 b). Oni su smješteni između turbina ili uz strojarnicu. Na taj se način izbjegava gradnja vodne komore na kraju kanala ili preljeva iz dovodnog u odvodni kanal. Takve su izvedbe danas napuštene, jer su bazeni derivacijskih hidroelektrana relativno mali, pa bi se voda preljevala preko brane kad ne bi postojali sinhroni ispusti. Tako mali bazeni dopuštaju samo djelomični vršni rad elektrane kad je dotok manji od Q_i .

Prolaz brodova omogućava se brodskim prevodnicama uz strojarnicu i bazenima za pristup na razini gornje i donje vode. Jednom prevodnicom ne može se savladati pad veći od 20m, pa se moraju predvidjeti dvije prevodnice u nizu pri većim visinskim razlikama (sl. 11). Budući da se sve više razvijaju sportovi na vodi, u nekim zemljama gradi se i staza za prijelaz čamaca. Mora se izgraditi i riblja staza. Kanali se grade za velike protoke i od nekoliko stotina m^3/s .

VISOKOTLAČNE HIDROELEKTRANE

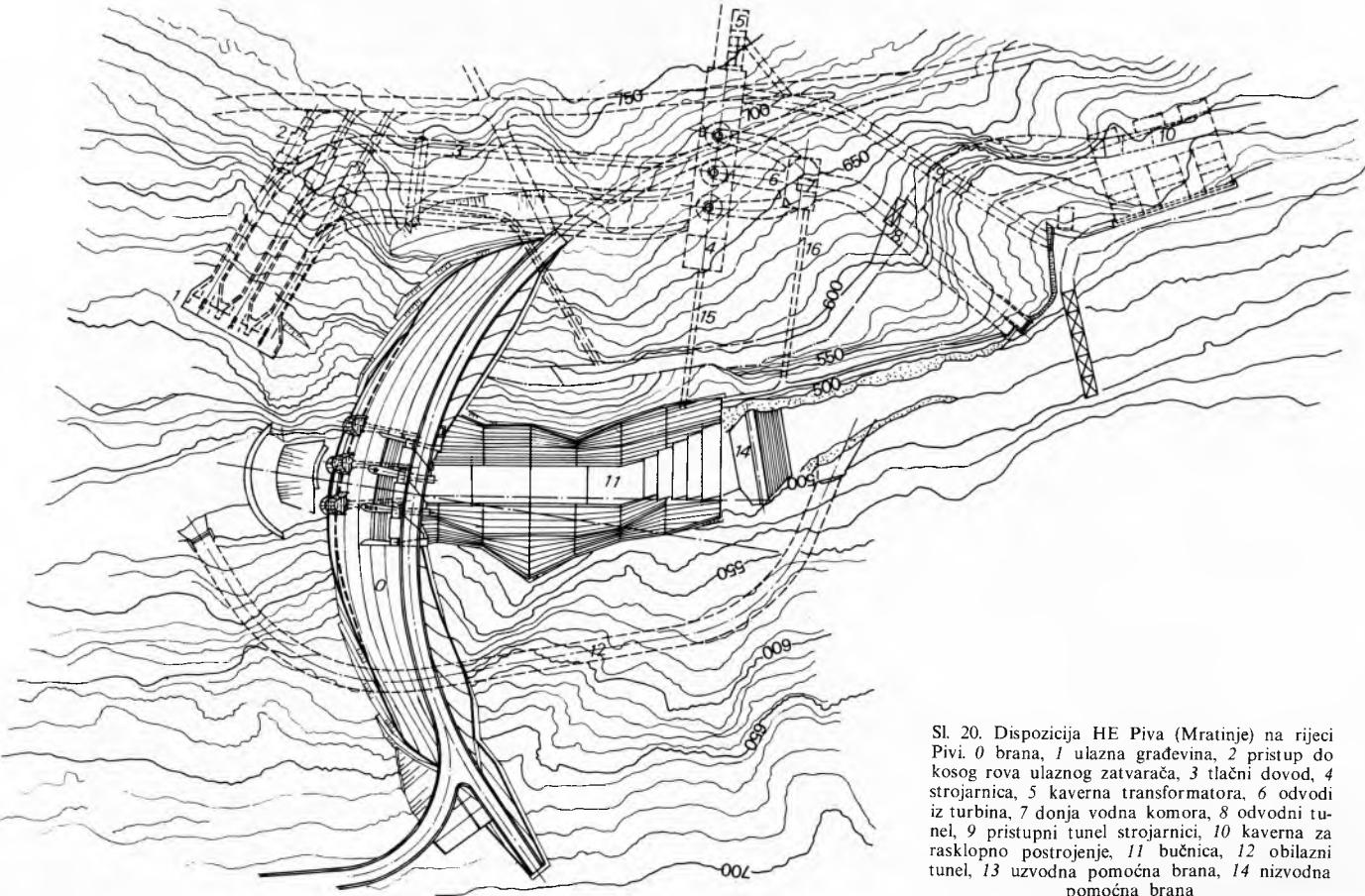
Hidroelektrane s padom većim od 50m mogu biti pribranske i derivacijske.

Pribranska hidroelektrana. S obzirom na veličinu uspora ove hidroelektrane su ujedno obično i akumulacijske s djelomičnom ili potpunom godišnjom regulacijom protoka i mogućnošću vršnog rada u toku dana. Mogu biti nadzemne ili podzemne. Ako je korito rijeke dovoljno široko, uz masivnu branu gradi se hidroelektrana s dispozicijom prema sl. 15. Kad je korito usko (v. Brane, TE2, sl. 19), strojarnica zauzima cijelu širinu riječne doline pa se organi za evakuaciju velikih voda smještaju u bokovima kao bočni preljevi s brzotokom ili kao preljevi kroz okno povezani s obilaznim tunelom koji je služio u vrijeme gradnje brane za skretanje vode mimo građevinske jame (v. Brane, HE2, str. 128). Rijetke su hidroelektrane sa strojarnicom u tijelu brane i preljevom s brzotokom iznad strojarnice (v. Brane, TE2, str. 128, sl. 22).

Tablica 2
NISKOTLAČNE HIDROELEKTRANE U SFRJ SNAGE VEĆE OD 20 MW

Ime HE	Rijeka	Q_i m^3/s	Bruto pad m	P_i MW	$W_{\text{sr god}}$ GWh	Godina puštanja u pogon
1	2	3	4	5	6	7
<i>Riječni tip</i>						
Fala	Drava	357,0	14,6	34,7	208,0	1912.
Dravograd	Drava	309,0	9,0	21,0	125,0	1943.
Mariborski otok	Drava	411,0	14,2	50,4	254,0	1948.
Vuzenica	Drava	411,0	13,7	53,4	222,0	1953.
Medvode	Sava	116,0	18,9	18,0	525,0	1955.
Zvornik	Drina	600,0	19,3	86,0	525,0	1955.
Vuhred	Drava	411,0	17,4	59,4	300,0	1956.
Ožbalt	Drava	411,0	17,4	59,4	310,0	1961.
Đerdap	Dunav	4350,0	25,7	1026,0	5200,0	1971.
<i>Pribranski tip</i>						
Potpć	Lim	165,0	37,9	51,0	229,0	1966.
Salakovac	Neretva	540,0	42,9	200,0	610,0	u grad.
<i>Derivacijski tip</i>						
<i>Gravitacijske (kanalske)</i>						
Manojlovac	Krka	36,0	136,5	32,0	132,0	1906.
Zlatoličje	Drava	450,0	33,0	127,5	658,0	1968.
HE Varaždin	Drava	450,0	23,0	86,0	476,0	1975.
HE Čakovec	Drava	450,0	16,4	66,8	342,0	u grad.
HE Ormož	Drava	450,0	29,0	111,0	570,0	u grad.
<i>Tlačne (tunelske)</i>						
Doblar	Soča	90,0	47,0	30,0	150,0	1939(P)
Jajce	Vrbas	76,0	48,0	27,0	164,0	1954(P)

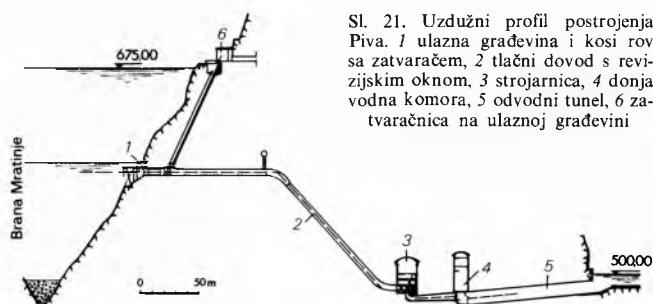
(P) podzemna strojarnica



Sl. 20. Dispozicija HE Piva (Mratinje) na rijeci Pivi. 0 brana, 1 ulazna građevina, 2 pristup do kosog rova ulaznog zatvarača, 3 tlačni dovod, 4 strojarnica, 5 kaverna transformatora, 6 odvodi iz turbinе, 7 donja vodna komora, 8 odvodni tunnel, 9 pristupni tunel strojarnici, 10 kaverna za rasklopno postrojenje, 11 bućnica, 12 obilazni tunel, 13 uzvodna pomoćna brana, 14 nizvodna pomoćna brana

HIDROELEKTRANE

Cijevni ispusti najčešće se grade simetrično, pa se mlazovi vode koja istječe sudaraju nizvodno od strojarnice i tako se rasipa višak energije. Lučne se brane grade u uskim kanjonima da bi se smanjili troškovi usporavanja vode i stvaranja akumulacije, pa prostor ispod brane u dnu korita nije uvijek dovoljno širok za smještaj strojarnice. Nekada se i izbjegava takva dispozicija jer je potrebno duboko ukopati objekte nizvodno od brane, što smanjuje sigurnost brane. Tada se strojarnice grade podzemno, na obali. Dovod je nešto dulji nego kroz tijelo brane, a odvod još dulji. Strojarnica se mora smjestiti nizvodno od injekcione zavjesе koja sprečava procjeđivanje vode iz jezera. Teži se da tlačni dovod bude dovoljno kratak da bi se izbjegla gradnja vodne komore zbog vodenog udara (v. *Elektrane*, TE3, str. 550), a eventualno i sinhronog ispusta u strojarnici. Primjer je takvog tipa HE Piva u Crnoj Gori (sl. 20 i 21). Vode se evakuiraju preko krune brane i kroz srednje i temeljne ispuste. To je najviša brana u nas (visina 220m).



Sl. 21. Uzdužni profil postrojenja Piva. 1 ulazna građevina i kosi rov sa zatvaračem, 2 tlačni dovod s revizijskim oknom, 3 strojarnica, 4 donja vodna komora, 5 odvodni tunel, 6 zatvaračica na ulaznoj građevini

Kad je brana nasuta od zemlje ili kamena, nije preporučljivo da tlačne cijevi prolaze kroz nasip, nego se voda dovodi turbinama tunelom (sl. 22). Strojarnica može, međutim, biti i nadzemna, položena uz nožicu brane ili paralelno s koritom. Uz takvu dispoziciju teško se izbjegava vodna komora na tlačnom dovodu.

Na sustavu dovod-odvod nalaze se četiri zatvarača. Na zahvatu i ispred turbine kao glavni, a pomoćni na kraju difuzora i odvodnog tunela (ako postoji). Na zahvatu su oni redovno tablasti, pred turbinom leptirasti do pada od 220m i kuglasti za padove od 100m i više. Pomoći su redovno pločasti i donose se, kad je potrebno, iz spremišta i spuštaju dizalicama. Turbine su najčešće Francisove, a Peltonove kad je instalirani protok mali. Na zahvat se postavlja rešetka. Ako se ne može čistiti s obale strojem za čišćenje, mora biti nagnuta prema tunelu da naplavine same spadnu. Kad su unutrašnji tlakovi veliki, dovod

je obično obložen čeličnim limom koji je do injekcione zavjesе tanji i nizvodno od zavjesе dimenzioniran je na puni unutrašnji i vanjski tlak.

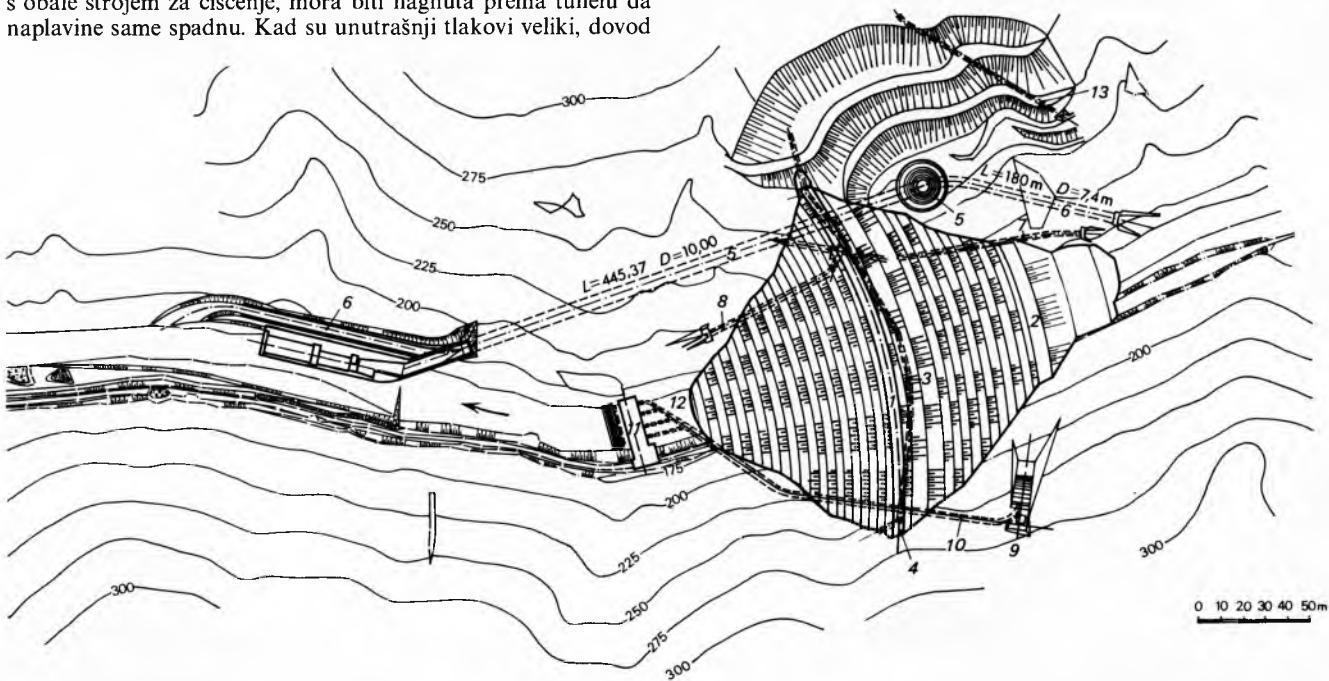
Derivacijska hidroelektrana. *Gravitacijske visokotlačne hidroelektrane* grade se danas samo na riječama na kojima se iz topografskih ili drugih razloga (npr. naseljenost) ne može usporiti voda iznad kote koja odgovara pragu u koritu potrebnom za skretanje vode (npr. iznad prirodnih vodopada). Voda se dovodi kanalom ako su obalne terase podobne za tu svrhu. Kraj je kanala kao u niskotlačnim hidroelektranama, ali iz njega vode dulje tlačne cijevi do strojarnice. Na ulazu u tlačne cijevi postavljaju se zatvarači. Dio dovoda može biti u tunelu, ali je tečenje gravitacijsko. Takva je HE Kraljevac (sl. 23).

Noću najčešće ima viška vode, jer takva hidroelektrana može raditi samo kao protočna. Zbog toga se na turbinama postavljaju sinhroni ispusti. Racionalnije se iskorištavanje vode postiže kad se iz kanala voda diže noću pomoću pumpi na manju visinu u akumulacijski bazen, a zatim se za vrijeme vršnog opterećenja iskorištava na cijelom padu do rijeke. Primjer je takvog rješenja hidroelektrana na slapovima Niagare (sl. 24).

Tlačne derivacijske hidroelektrane jesu uz pribranske visokotlačne najčešći tip u našim terenskim uvjetima. Obje varijante

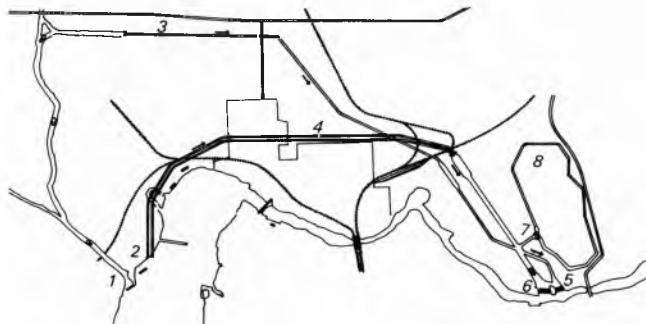


Sl. 23. Pogled na kraj dovodnog kanala, vanjske tlačne cijevi, strojarnicu i odvodni kanal HE Kraljevac na Cetini



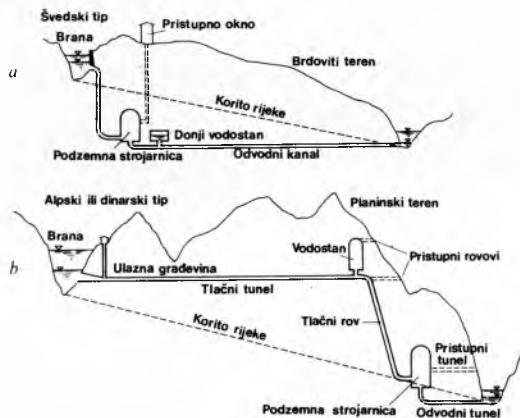
Sl. 22. Dispozicija HE Tikveš na Crnoj reci u Makedoniji. 1 brana, 2 predbrana, 3 kontrolna galerija u dnu jezgre brane, 4 injekcione zavjesе, 5 preljev kroz okno, 6 obilazni tunel, 7 temeljni ispust, 8 pristupni tunel zatvaraču, 9 zahvat, 10 tlačni dovod, 11 strojarnica, 12 rasklopno postrojenje, 13 tunel za navodnjavanje Tikvešije

imaju prednost pred ostalim tipovima jer se tako iskorištava ukupni pad i akumulirana voda iz bazena ili iz prirodnog jezera na najjednostavniji način. Tada je zahvatna građevina smještena dovoljno duboko, tj. ispod minimalne razine u jezeru. Postoje dva tipa tlačnih derivacijskih hidroelektrana: švedski i alpski ili dinarski tip.



Sl. 24. Dispozicija postrojenja na slapovima Niagara—Kanadska obala. 1 i 2 zahvatne građevine, 3 stari dovodni kanal s ustavom na ulazu, 4 gravitacijski tuneli i kanal do strojarnice br. 2, 5 stará elektrárna, 6 nova hidroelektrárna, 7 pumpno-akumulační hidroelektrárna, 8 gorní bázén pumpno-akumulačních hidroelektráren

Švedski tip hidroelektrane (sl. 25a). Dovod je, u stvari tlačna cijev, kratak. Strojarnica je uvijek podzemna, a odvodni tunel je gravitacijski. Ako je pod tlakom, mora imati donju vodnu komoru. Taj se tip gradi kad su stijene vodonepropusne i odličnih elastičnih svojstava. To su najčešće eruptivne stijene. Zbog dobre kvalitete brdskog masiva nema veće opasnosti od prodiranja vode u strojarnicu iako se nalazi u neposrednoj blizini jezera. Gradi se u Švedskoj, gdje ima mnogo područja s granitnim stijenama.



Sl. 25. Tipovi tlačnih derivacijskih hidroelektrana: a) švedski tip, b) alpski ili dinarski tip s podzemnom strojarnicom na kraju

Alpski ili dinarski tip hidroelektrane (sl. 25b) karakterizira dugi i relativno visoko položeni dovodni tlačni tunel s ulaznom građevinom i kulom zatvaračnicom, vodna komora, tlačna cijev, strojarnica i odvodni kanal građen kao tunel ili djelomično kao tunel i kanal. Strojarnica je nadzemna ili podzemna. Ako je strojarnica podzemna, odvodni tunel može se izvesti da bude stalno pod tlakom ili samo povremeno za vrijeme velikih voda u koritu rijeke, ili da radi stalno kao gravitacijski tunel. U prvom slučaju mora se izgraditi donja vodna komora.

Zbog relativno visokog položaja dovodnog tunela taj se tip gradi u propusnim, raspucalim i kavernoznim stijenama jer je niveleta tunela ispod razine podzemne vode samo u razdoblju jakih kiša, a veći dio tunela, ako je povoljno izabrana trasa, uvijek je iznad nje. Podzemna voda tada manje ometa izbjeganje i betoniranje tunela, a zastoji su za vrijeme gradnje kraći. Takvih stijena ima u Alpama i u našem kršu, pa je u tim područjima pogodno graditi taj tip hidroelektrana.

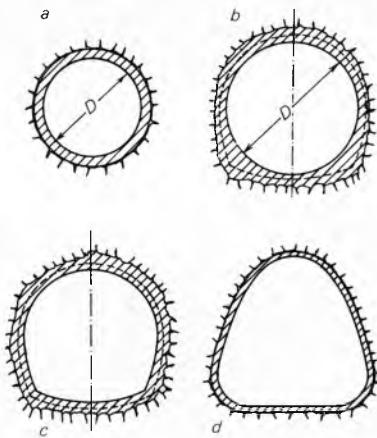
Proizvedena energija ovisi o vodi dovedenoj turbinama, pa je bitno da je dovodni tunel praktički vodonepropustan. U malo

vodopropusnim stijenama smatra se nerentabilnim gubitak vode veći od 1 l/s po 1000 m^2 površine obloge tunela. U nas u kršu gubitak je vode $2\cdots 3\text{ l/s}$. Zbog utjecaja hidrogeoloških uvjeta na troškove gradnje tunela, izbor trase tunela zahtijeva relativno duga i detaljna prethodna istraživanja. Kako skretanjem vode u podzemnu derivaciju korito ostaje suho, danas se taj tip hidroelektrana rijetko gradi uzduž glavnog toka rijeke. On se izvodi u složenim sustavima iskorištavanja vode ili u uzvodnjim, slabo naseljenim područjima. Derivacije služe i za odvod vode s pavljenih kraških polja, dovod vode u područja gdje ona nedostaje, odvod u more, ali uz prethodno iskorištavanje, ili za pumpanje vode u gornje bazene pumpno-akumulacijskih hidroelektrana.

Tlačna derivacijska postrojenja nemaju u tunelu veliki unutrašnji tlak, jer to komplikira i poskupljuje gradnju. Obično raspolažu samo s bazenom za dnevno izravnavanje protoka. Tako je građena HE Zakučac koja iskorištava glavni pad rijeke Cetine (sl. 8). Protok se regulira akumulacijom Peruća, gdje je pribranska hidroelektrana, i na Livanjskom polju akumulacijom Buško Blato, iz koje se voda iskorištava i u HE Orlovac. HE Orlovac je složeno postrojenje koje se sastoji od gravitacijskih kanala i tlačnog tunela. Kanali skupljaju vodu i dovode je u kompenzacijiski bazen Lipa, odakle ide u tlačni tunel. Višak vode odlazi reverzibilnim kanalom u akumulaciju Buško Blato, u koju dotječe i voda iz vlastitog sliva. Kad nema dovoljno vode iz Livanjskog polja, dovodi se voda iz akumulacije u bazen Lipa, a odatle u HE Orlovac. Budući da je kota razine vode u akumulaciji nekada viša od kote vode u kanalu, izgrađeno je pumpno postrojenje koje podiže vodu u akumulaciju. U suprotnom smjeru tečenja vodom se proizvodi električna energija.

Ako tunel izlazi neposredno iz akumulacije velikog volumena, to je kombinirano postrojenje. U tunelu je unutrašnji tlak $8\cdots 12\text{ atm}$ ($0,8\cdots 1,2\text{ MPa}$), pa je potrebno skupo injektiranje tunelske obloge.

Dovodni tunel. Dovodni tunel obično je kružnog presjeka jer je to hidraulički i statički najpovoljniji oblik. No pri malim unutrašnjim tlakovima tuneli imaju oblik potkove (sl. 26).



Sl. 26. Karakteristični presjeci tunela: a) kružni iskop manjeg profila, b) iskop velikog profila, proširen u dnu radi transporta, c) tunel s malim tlakom, d) košarasti profil

Optimalni je promjer D kružnog tunela kad je zbroj godišnjih troškova u elektroenergetskom sistemu minimalan. Godišnji su troškovi

$$\Sigma T = T_g + \Delta N_g + \Delta E_g = f(D), \quad (11)$$

gdje su T_g godišnji troškovi tunela, ΔN_g godišnji troškovi za dopunska snagu u termoelektranama zbog gubitaka u tunelu, a ΔE_g troškovi za dodatnu proizvodnju u elektranama zbog gubitaka u tunelu. Minimalni se troškovi postižu kad je $d(\Sigma T)/dD = 0$, jer su sve veličine u (11) funkcije promjera tunela, budući da se njegova duljina smatra zadatom. Nakon što se uvrste vrijednosti pojedinih članova u relaciju (11) i nakon deriviranja, dobiva se

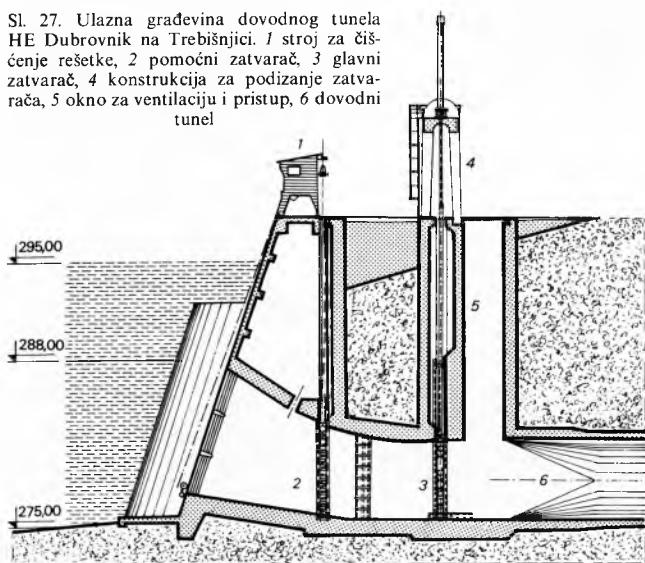
$$D = \sqrt[7.33]{\frac{5.53(AQ_1^3C_3 + BQ_m^3C_4)}{\frac{\pi p}{2}(1.08C_1 + 0.08C_2) + \frac{1.08\pi p S}{D}(C_1 + C_2)}}, \quad (12)$$

gdje je A veličina koja ovisi o brzini vode u tunelu pri protoku Q_i i o koeficijentu hravavosti po Manning-Strikleru (koji iznosi $70 \dots 75$), B produkt broja sati u godini (8760 sati) i veličine A , S prosječna debljina obloge u tunelu, p stopa godišnjih troškova za građevinske radove, C_1 cijena iskopa $1m^3$ uključujući i pripremne radove za iskop, C_2 srednja cijena betona za oblogu uključujući armirani i nearmirani beton, oplatu i injektiranje, C_3 stalni troškovi za dopunski kW u termoelektrana, C_4 troškovi za gorivo po kWh za dopunska proizvodnju u termoelektranama, a Q_m je protok uz koji se postižu jednaki gubici u tunelu kao uz promjenljivi stvarni protok. Veličina Q_m izračunava se iz relacije

$$Q_m = \left(\frac{\sum Q_n \Delta t}{8760} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

u kojoj su Q_n srednji mjesечni protoci, a Δt broj sati u mjesecu. Optimalni promjer D određuje se iz (12) pokusavanjem. Već prema pojedinim troškovima, optimalna brzina vode u tunelu pri protoku Q_i iznosi $3 \dots 4$ m/s. Uzalazna brzina ne treba, međutim, iz hidrauličkih razloga, biti veća od 1,2 m/s. Zbog toga ulaz tunela ima ljevkasti oblik. Rešetka sprečava ulaz u tunel nečistocama koje plivaju i lebde. U oknu na kraju ulazne građevine postavlja se zatvarač kojim se upravlja s površine. Mechanizam za dizanje ima hidraulički ili električni pogon. Okno je tako oblikovano da može izlaziti zrak kada se tunel puni. Zatvarač brtvi prema uzvodnoj strani pa nizvodno okno služi i za ventilaciju (sl. 27). Prilikom punjenja zatvarač se samo malo podigne i tako ostaje sve dok se tunel ne napuni i dok se ne izravnava tlak. Ako je dio dovoda izveden kao cjevovod, zatvarač mora imati uređaj za automatsko spuštanje ako se ošteti cjevovod. Ventilacijsko okno služi za spuštanje vozila za kontrolu tunela u doba remonta.

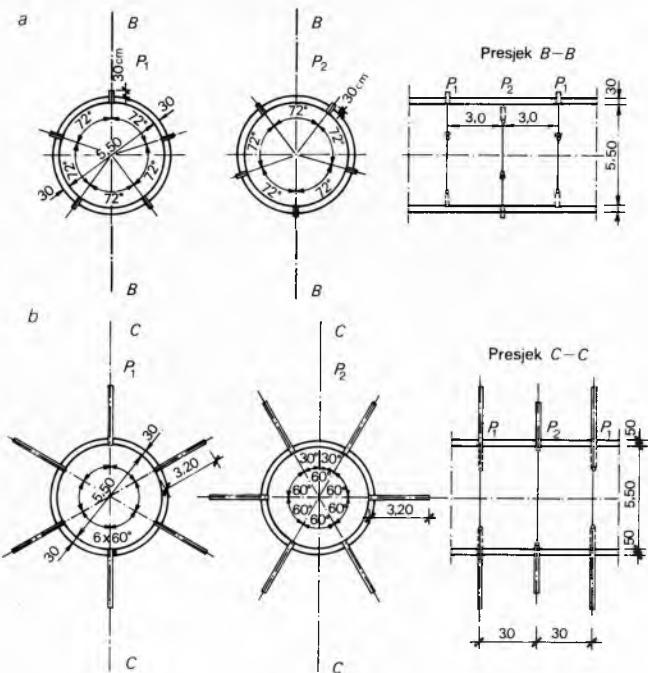
Sl. 27. Uzalazna građevina dovodnog tunela HE Dubrovnik na Trebišnjici. 1 stroj za čišćenje rešetke, 2 pomoći zatvarač, 3 glavni zatvarač, 4 konstrukcija za podizanje zatvarača, 5 okno za ventilaciju i pristup, 6 dovodni tunel



Visinski položaj osi tunela na ulazu ovisi o minimalnoj radnoj razini u jezeru, a vodne komore o najnižoj koti razine vode koja se može pojaviti pri naglom otvaranju turbina. Da ne bi ulazio zrak u tunel, tjeme se tunela na kraju ulazne građevine nalazi jedan do dva promjera tunela ispod minimalne radne razine u jezeru, već prema brzini vode u tunelu. Slično vrijedi i za vodnu komoru.

Izbijanje tunela sa skelom i nizom bušilica zahtijeva velike prekope i poskupljuje betonsku oblogu, pa se znatno premašuje uobičajeno predviđeno povećanje presjeka od 8%. To se izbjegava upotrebom rotacijskih strojeva s glodalicama (tzv. krtice) koje slijeku točan kružni profil. Tako se ne samo smanjuje opseg

radova nego se i ne pogoršava kvaliteta stijene, jer se one ne miniraju. No, zato ima drugih poteškoća koje se pojavljuju kad brdski masiv nije jednolično stjenovit i kad se pojavi voda.



Sl. 28. Način injektiranja dovodnog tunela: a vezno injektiranje, b konsolidacijsko injektiranje

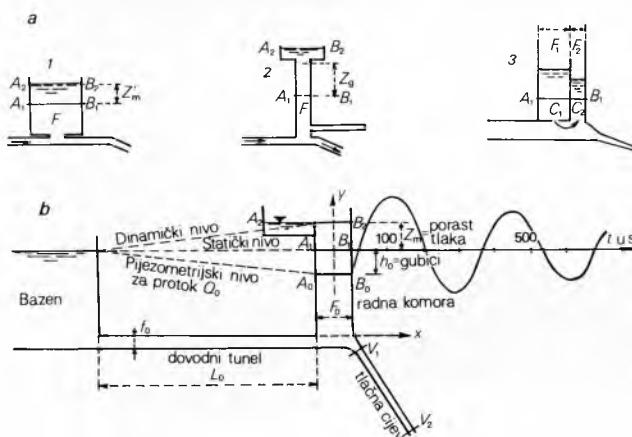
Voda, naime, otežava i poskupljuje radove. Vrela se moraju kaptirati, a kaverne ostaviti nezatrpane da se nakon kiše omogući otjecanje vode. Posebne su poteškoće u nas u kršu, gdje se nailazi nekada na velike vodonosne pukotine i kaverne. Betonska obloga može biti izvedena od prskanog betona, djelomično od montažnih elemenata ili pomoću tzv. teleskopske oplate. Prvi način dolazi u obzir kad se radi s krticom. U nas se još uvijek više primjenjuje betoniranje zbivanjem pomoću vibratora. Zbog radikalnog djelovanja tlaka vode u oblozi pojavljuju se naponi zatezanja, odnosno tangencijalni napon, što može uzrokovati pucaje prstena i gubitak vode veći od dozvoljenog, jer je obloga relativno tanka s obzirom na promjer tunela (obično 30-60 cm ne-armirana ili armirana). Da se to sprijeći, iza oblage se utiskuje cementni malter i cementno mlijeko pomoću injekcije. Vezno injektiranje osigurava dobru vezu između betona i okolne stijene i popunjava šupljine u betonu. Uzrokuje, u neku ruku, prednaprezanje oblage, ako se dobro izvede, i na taj se način sprečava pucanje oblage. Ako je brdski masiv slabih elastičnih svojstava, izvodi se konsolidacijsko injektiranje do dubine 3-5 m i time poboljšava kvalitet stijene, sprečavaju se veće deformacije i pucanje oblage. Broj je injekcionalih bušotina u profilu veći od 3, ovisan o promjeru tunela; njihov je raspored uzduž tunela izmjeničan (sl. 28). Prema iskustvu, injekcionali tlak za vezno injektiranje u našim uvjetima iznosi najmanje 8 at, odnosno 1,5 puta unutrašnji tlak, a za konsolidacijsko barem 2-3 puta veći od unutrašnjeg tlaka. Utrošak cementa iznosi 20-50 kg/m² oblage u prvom, a 50-100 kg/m² u drugom slučaju. Obloga tunela proračunava se statičkim proračunima a najčešće se primjenjuje Frey-Baerova metoda. Danas se mnogo bolje može dimenzionirati obloga i utvrditi naponsko stanje u oblozi i oko nje pomoću metode konačnih elemenata, koja se razvila u zadnjih nekoliko godina. Sve metode traže dobro poznavanje geometrijskih svojstava brdske mase oko tunela, pa se ona u toku gradnje statički i dinamički ispituje. Najveći promjer dovodnog tunela u nas ima PAHE Čapljina, 8,0 m, a u svijetu se grade tlačni tuneli i znatno većih promjera ako je kvaliteta stijene dobra.

Neobloženi tuneli mogu se graditi kad su stijene čvrste i vodonepropusne. U pogonu se urušava materijal pa se na kraju tunela grade velike taložne komore radi zaštite turbina od oštećenja. Praksa je pokazala da u takvim tunelima nastaju veća

obrušavanja zbog djelovanja vode pod tlakom iz tunela. U nas nema takvih dovodnih tlačnih tunela.

Vodna komora. Zadatak je vodne komore na kraju tlačnog tunela da sprečava širenje povećanog tlaka, koje nastaje pri zatvaranju i otvaranju lopatica privodnog kola turbina zbog promjene opterećenja, na dovodni tunel te da smanji to povećanje u cjevovodu. Val povećanog tlaka u cjevovodu ili hidraulički udar odbija se od slobodne razine u vodnoj komori pa se tako sprečava njegovo širenje u dovodni tunel, a u tlačnoj se cijevi smanjuje tlak (nepotpuni hidraulički udar).

Pri djelomičnom ili potpunom rasterećenju elektrane smanjuje se ili potpuno prekida dovod vode u turbinu. Međutim, zbog inercije kretanje se vode u tunelu nastavlja, pa to podiže razinu vode u vodnoj komori iznad hidrostatickog tlaka. Preljevom mlaza u tzv. gornju komoru ili preljevni tunel razina se vode ograničava pa tlak u tunelu samo malo poraste, što bitno ne opterećuje oblogu, pa nije ni potrebno povećati njenu debeljinu. Kad prestane kretanje vode u dovodu, zaustavlja se izdizanje razine u vodnoj komori. Kako je razina vode u njoj tada viša od hidrostatickog tlaka, počinje se voda kretati u suprotnom smjeru, tj. prema ulaznoj građevini. Kolebanje razine u vodnoj komori traje sve dok se energija vodene mase ne utroši na savlađivanje otpora u tunelu. Tada se ponovno uspostavlja hidrostaticka razina. Tok oscilacija prilikom otvaranja i zatvaranja turbine vidi se na sl. 29.



Sl. 29. Vodna komora. a) tipovi vodne komore: 1 cilindrična vodna komora s prigušivačem, 2 s komorama, 3 diferencijalna vodna komora sa dva okna različitog presjeka; b) oscilacije razine vode u vodnoj komori pri naglom zatvaranju

Pri djelomičnom povećanju opterećenja turbine ili pri potpunom otvaranju dovoda vode, najprije se razina u vodnoj komori spušta, zatim diže itd.

S obzirom da se u normalnom pogonu male oscilacije često pojavljuju, moguće je tendencija da se stalno povećavaju ili smanjuju. Zbog toga se u postrojenju moraju stvoriti takvi uvjeti da se nastala kolebanja razine što brže smire. Vodna se komora dimenzionira tako da se postigne stabilnost oscilacija. Pri tome se mora poznavati maksimalna amplitudna koja se može pojavit u pri najnepovoljnijem pogonskom zahvatu u strojarnici. Potrebeni presjek okna vodne komore prvi je odredio D. T. Thoma uz uvjet da se još javljaju trajne oscilacije ali konstantne amplitude, tj. da je vodna komora stabilna. Taj je presjek

$$F = \frac{L_0 f r_0^2}{2 g h_0 (H_0 - h_0)}, \quad (14)$$

gdje je L_0 duljina tunela, f poprečni presjek tunela, v_0 brzina u tunelu pri protoku Q_i , H_0 bruto pad i h_0 gubitak tlaka u tunelu pri protoku Q_i . J. Frank je ustanovio da taj kriterij daje prihvatljive rezultate kad je odnos $\frac{h_0}{H_0} = \beta < 0,04$. G. Schreiber

je dalje razradio kriterij stabilnosti i uveo omjer amplitudu drugog vala prema amplitudi prvog vala kao kriterij stabilnosti i uveo omjer amplitudu drugog vala prema amplitudi prvog vala kao kriterij smirivanja oscilacija. Taj omjer treba da iznosi $\zeta \leq 0,5$.

Kritični je pogonski zahvat, na temelju kojeg se zaključuje o stabilnosti, otvaranje turbine od 0 do 100%. Omjer $\frac{L f r_0^2}{g F h_0^2} = \epsilon$ naziva se karakterističnim brojem vodne komore. Na osnovi utvrđenog β i određenog nomograma može se odrediti ϵ a time i potreban presjek vodne komore za određeni ζ . U praksi se presjek (14) mora to više povećati što je nepovoljniji odnos $\frac{h_0}{H_0}$, tj. što su veći gubici u dovodu. Uvjet

stabilnosti teško je postići u postrojenju srednjeg i malog pada, gdje su hidraulički gubici s obzirom na raspoloživi pad veliki. Zbog toga se grade u praksi vodne komore s prigušivačima. Voda prilikom dizanja u okno vodne komore prolazi kroz suženi presjek i tako se povećavaju gubici tlaka i brže smiruju oscilacije. Potrebeni presjek za vodne komore s prigušivačem odredio je L. Escande. Za zadano podizanje razine u vodnoj komori presjek F može biti dva puta manji ako se izabere optimalno prigušenje. Gubitak tlaka h_0 u dovodu proračunava se po formuli

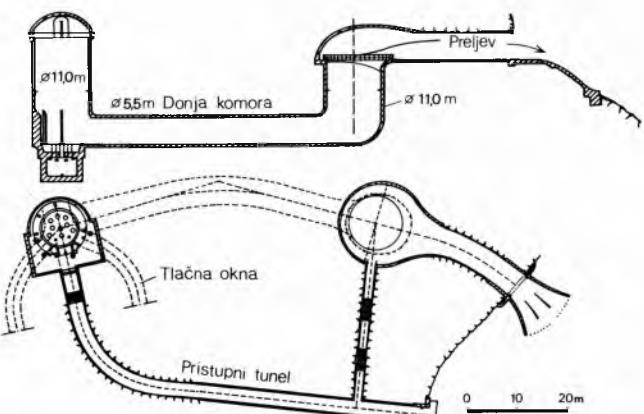
$$h_0 = h_t + h_j, \quad (15)$$

h_j su lokalni gubici koji obuhvaćaju gubitke na ulazu, kroz rešetku, u difuzoru i konfuzoru oko zatvarača, na krivinama itd., a $h_t = \frac{v^2 L_0}{K^2 R^{4/3}}$ gubici u tunelu, koji ovise o obliku profila

tunela i koeficijentu glatkoće obloge K . Prilikom dimenzioniranja vodne komore ne računa se sa stvarnom vrijednošću K kojom se računaju gubici pri proračunu snage postrojenja, nego manjom ($K = 65$) ako se računaju dimenzije donje komore, a većom ($K = 90$) za dimenzije gornje komore. Gornja komora ograničava vrh amplitude pri naglom zatvaranju turbine a donja sprečava suviše veliko spuštanje razine pri naglom otvaranju turbine. U određenim povoljnim okolnostima vodna komora može biti bez donje ili bez gornje komore.

Vodna komora tlačnog postrojenja vidi se na sl. 30. Izbor oblika i dimenzija vodne komore jedan je od složenijih problema u hidroenergetici i rješavaju ga zajednički projektant i isporučilac turbine, jer od toga zavisi pravilno funkcioniranje elektrane. Proračunate vrijednosti provjeravaju se za složenije slučajevne na hidrauličkom modelu. Ako je i odvod pod tlakom, u računu treba razmatrati spregnuti rad dovoda i odvoda.

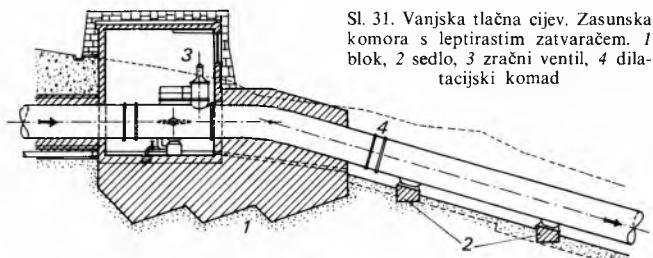
Na ulazu u tlačnu cijev (u vodnoj komori ili neposredno iza nje) postavlja se drugi zatvarač. Ako je u vodnoj komori, on je tablastog tipa s mehanizmom za podizanje koji se nalazi iznad maksimalne razine vode u vodnoj komori. Zatvarač se zatvara automatski i brzo kad se poveća brzina vode zbog pucanja tlačne cijevi. Iza tablastog zatvarača postavlja se cijev za odzračivanje tlačne cijevi u u zatvaraču otvor za njeno punjenje. Budući da vodna komora mora biti u donjem dijelu otvorena, gornji dio ima izlaz s pristupnim tunelom. U pogodnim uvjetima gornja komora se gradi kao bazen na površini oivičen nasipom ili branom. U oknu treba predvidjeti čelične ljestve ili stepenice



Sl. 30. Vodna komora s prigušivačem cijevnog tipa HE Jajce II na Vrbasu sa dva okna i preljevom

HIDROELEKTRANE

s odmorištem. U dnu vodne komore dobro je načiniti taložnicu da se zadrže otpaci obloge ili nepokupljeni ostaci u tunelu, kako bi se od njih zaštitile turbine.



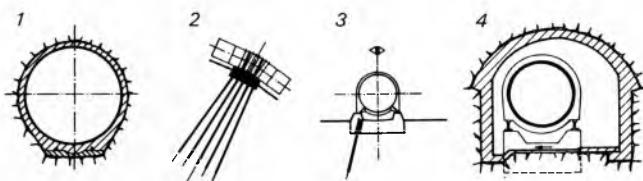
Sl. 31. Vanjska tlačna cijev. Zasunská komora s leptirastim zatvaračem. 1 blok, 2 sedlo, 3 zračni ventil, 4 dilatacijski komad

Ako ima više tlačnih cijevi, teško je smjestiti sve zatvarače u vodnu komoru. Osim toga, građevni i montažni radovi tada se vremenski preklapaju. Zbog toga se postavljaju leptirasti zatvarači u tlačne cijevi smješteni u posebnoj komori ili neki drugi tip cijevnih zasuna (sl. 31). Često se ugrađuju dva zatvarača zbog sigurnosti. To, međutim, nije opravданo jer je nevjerojatno da cijev pukne uz kontrolu koja je danas uobičajena i moguća. Iza cijevnog zatvarača nalazi se zračni ventil, a tlačne cijevi se pune kroz obilaznu cijev (by-pass).

Tlačne cijevi. Voda iz dovodnog tunela dovodi se turbinu nadzemnom ili podzemnom tlačnom cijevi. Taj je dio dovoda pod najvećim unutrašnjim tlakom, pa je skup i osjetljiv. Stoga treba s posebnom pažnjom izabrati trasu i način osiguranja. Kad se cijev polaže po površini terena, treba pronaći tlo koje se ne slijedi i koje nije ugroženo od klizanja i vanjskih oštećenja. Ako je padina blago nagnuta, cijev je duga i skupa, a njezina zaštita od djelovanja vodenog udara složena. Maksimalni porast tlaka na dnu cijevi ovisi, naime, o udaljenosti L od ulaza u turbinu do prve slobodne površine uzvodno od tlačne cijevi (vodna komora ili bazen za švedski tip). Taj je porast tlaka $\Delta H_0 = \frac{2Lv_0}{T_g}$, gdje je T trajanje zatvaranja ili otvaranja turbine.

Podzemnim smještajem strojarnice smanjuje se duljina cijevi (ona može biti i okomita), pa su pogon hidroelektrane i izradba cijevi jednostavniji. Tako su, osim toga, i strojevi bolje zaštićeni. Za podzemne strojarnice dio cijevi može biti položen po površini, a samo donji dio ukopan u brdskom masivu. Trasa i tip toga dijela dovoda ovisi, dakle, o položaju strojarnice, terenskim uvjetima, padu i ekonomičnosti. Položaj cijevi položene po površini osigurava se fiksnim točkama (blokovima) na mjestu loma trase, a između njih cijev se oslanja na sedla međusobno udaljena 10...15 m (sl. 32). Blokovi su betonski, masivni, a kad je to moguće cijev se veže uz tlo čeličnim obujmicama i sidrima. Da se izbjegne djelovanje sile pobuđenih temperaturnim promjenama, stavljuju se iza blokova posebni dilatacijski komadi ili sastavi s brtvama, koji dopuštaju skraćivanje i produljenje cijevi. Razmak blokova ne treba biti veći od 200 m.

Podzemne su cijevi slobodno položene u rovu (sl. 32) ili ubetonirane i zainjektirane. Rov za slobodno položenu cijev obično je kos, a za ubetoniranu najčešće je vertikalni, jer se tako smanjuje duljina, pojednostavljuje transport i kontrola. Ako je stijenski masiv kompaktan, za ubetonirane cijevi može se računati da stijena preuzima dio opterećenja, što omogućava da se dopuštena naprezanja lima povećaju ~30%. Tada se postižu velike uštede na limu, mogu se izvesti cijevi većeg promjera



Sl. 32. Detalji tlačne cijevi. 1 ubetonirana tlačna cijev u kosom rovu za HE Senj $\phi 3,5\text{--}4,0\text{ m}$, 2 tipski blok s prednapregnutim sidrima duljine 18,0 m za tlačnu cijev HE Orlovac, 3 presjek kroz tlačnu cijev HE Orlovac $\phi 3,65\text{--}4,10\text{ m}$ na mjestu sedla i bloka, 4 slobodno položena tlačna cijev u kosom rovu

i lakše je pronaći lim potrebne kvalitete. Teži se, naime, da lim ne bude deblji od 40 mm, da se može zavarivati samo s unutrašnje strane. Tako se za ubetonirane cijevi smanjuje potreban međuprostor između zidova rova i lima cijevi na širinu od 30 cm. Proizvode se specijalni limovi za tlačne cjevovode hidroelektrana. U kosim rovima se za transport cijevi postaviti kolosijek, što produžava trajanje gradnje. Cijev se montira odozdo prema gore. Polucilindri se zavaruju na radilištu i sastavljaju u komade cijevi od 6 m. Kad je predviđeno ubetoniranje cijevi, najprije se željeznim motjkama fiksira njen položaj u rovu. Zatim se zavari i испита var pa se cijev ubetonira. Varovi se kontroliraju ultrazvukom, a unakrsni spojevi i rendgenskim snimanjem. Injektira se na kontaktu čelik—beton i beton—stijena. To su vezne injekcije na sličnom principu kao u tunelu. Konsolidacijske injekcije izvode se onda kada su potrebne. Tlakovi su znatno niži (obično 2...4 atm) nego kad se injektira u tunelu, da se ne bi cijevi deformirale. Rupe u limu za injektiranje buše se već prije dopreme na gradilište i imaju posebne poklopce s narezom. Oni se nakon injektiranja zavaruju. Obično je jedna rupa na površini $5\text{--}7\text{ m}^2$ lima.

Slobodno položene cijevi u rovu i vanjske cijevi moraju se zaštiti od korozije.

Promjer cijevi određuje se proračunom na istim principima kao promjer dovodnog tunela. Postoje i empirijske formule. Međutim, brzina vode u donjem kraju cijevi ne bi trebala da bude veća od 6 m/s, jer se tada pojavljuju poteškoće s vodenim udarom. Potrebna debljina lima ovisi o ukupnom statičkom i dinamičkom tlaku H , o promjeru cijevi D i o dopuštenom

$$\text{naprezanju } \sigma \text{ prema izrazu } \delta = \frac{DH}{2\sigma}.$$

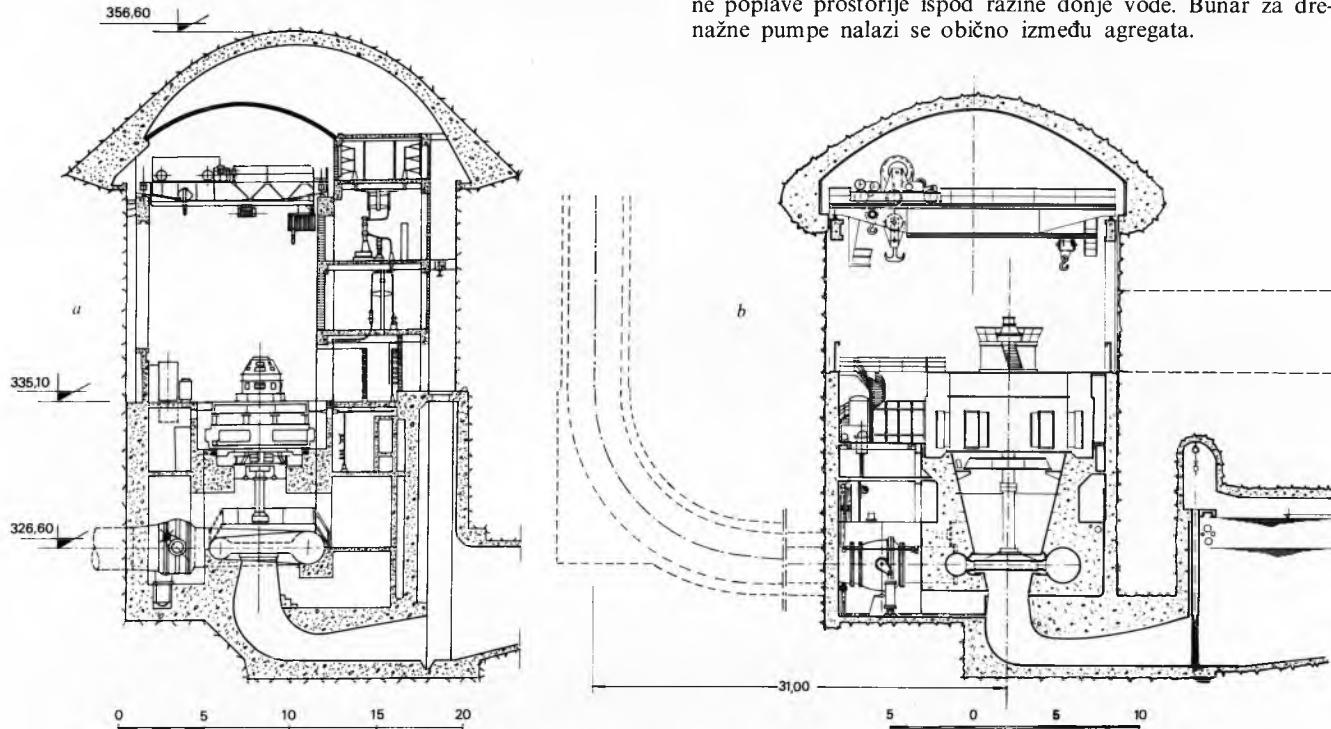
Stoga je u elektranama s velikim padom potrebno ograničiti porast tlaka koji nastaje vodenim udarom. To se u Peltonovim turbinama postiže otklanjačem mlaza. On brzo rastereće turbinu, a regulacijska igla može tada sporo zatvarati dovod vode. U Francisovoj turbinu to se može postići regulatorom tlaka (sinhronim ispustom). Regulacijom trajanja zatvaranja tog ispusta može se porast tlaka smanjiti na iznos 10...15% od statičkog tlaka. Inače on može doseći 30...50%.

Ako je instalirani protok velik, uz veći pad mora se povećati broj cijevi, da bi se smanjio njihov promjer. U velikim hidroelektranama svaka turbina ima obično i svoju cijev. Kad su na ulazu u tlačnu cijev tablasti zatvarači, sve cijevi izlaze neposredno iz vodne komore. Ako ih je više od tri, tada se račvaju iza vodne komore a zatvarači su cijevni i moraju se smjestiti u zasunskoj komori. Bilo da se račva nalazi iza vodne komore ili ispred turbine, treba da bude simetrična da bi hidraulički gubici bili što manji. Izvedba donje račve je složen zadatak u elektrani velikog tlaka. Ubetonirane cijevi treba osigurati i od vanjskog tlaka vode. Radi toga se cijev ojača prirubnicama ili se lim usidri u okolini beton zarenim betonskim žlezdom uzduž cijelog plasti cijevi.

Ispitivanja na nekim ukopanim tlačnim cijevima u nas pokazala su da ~70% opterećenja preuzima okolni masiv, a lim samo 30%. Računa se, obično, da lim preuzima veće opterećenje. To znači da je lim slabo iskorišten, pa bi se dopuštena naprezanja mogla povećati, naravno, ukoliko je stijena dobrih elastičnih osobina po cijeloj duljini cijevi. Danas su razvijene metode iskopa koje omogućavaju dovoljno unaprijed uvid u kvalitete stijene. Kad se iskopava Alimak-strojevima, tada ispitivanje kvalitete nije teško sprovesti jednom od dinamičkih ili statičkih metoda.

Strojarnica može biti nadzemna ili podzemna. Najveći dio hidroelektrana ima nadzemne strojarnice, ali između dva rata, osobito kasnije, mnoge su strojarnice izgrađene u podzemlju. U nas je u posljednjih 30 godina izgrađeno 18 podzemnih strojarnica iz ekonomskih ili sigurnosnih razloga. Izbor položaja strojarnice spada u kompleks rješavanja dispozicije postrojenja kojem prethode relativno dugotrajna i složena istraživanja i ekonomski analize. To naravno vrijedi kad podzemni smještaj uopće dolazi u obzir, kad su stijene relativno povoljnijih elastičnih svojstava ($E_{el} \geq 80000 \text{ kp/cm}^2$) i kad ne treba očekivati veći priliv podzemne vode. U nas su najveće podzemne strojarnice

jarnice izgrađene u vapnencima krša, jer su tamo utvrđeni povoljni uvjeti za njihov smještaj. Pri određivanju položaja strojarnice potrebno je izabrati povoljnu orientaciju s obzirom na pad slojeva, utvrditi elastične osobine stijene, diskontinuitete i naprezanja u pojedinim fazama izbijanja i nakon dovršenja iskopa. Metoda konačnih elemenata uz prethodna i naknadna mjerena može pomoći da se riješe svi problemi stabilnosti. Profil se obično osigurava betonskim svodom i eventualno prijenosom opterećenja pomoću perfo-sidara u tjemenu i sidrenja na stranama tunela. Perfo-sidra sprečavaju ispadanje manjih blokova



Sl. 33. Tipovi strojarnica: a HE Jajce I s rasklopnim postrojenjem 35 kV u kaverni, b HE Dubrovnik

zbog nepovoljnih naprezanja uz konture iskopa u srednjoj trećini profila, pa se opterećenja, kad je to potrebno, moraju prenijeti u dubinu pomoću prednapregnutih sidara. No, ima nekoliko izgrađenih strojarnica u nas bez sidara, jer se ona u vrijeme njihove gradnje nisu još u nas upotrebljavala. Načinom iskopa mora se također težiti da se što manje oštete stijenke tunela strojarnice, što se postiže prethodnim gustim bušotinama blizu linije iskopa po konturi tlocrta. Budući da je visina tunelskih profila 30–40m, a raspon 10–20m, moraju se pojedine faze radova dobro isplanirati i projektirati, da se izbjegnu po-teškoće.

Dimenzije strojarnice ovise o broju agregata i njihovoj snazi, te o smještaju transformatora i razvoda nižeg napona u strojarnici ili izvan nje. Osim toga, na širinu zgrade utječe položaj dovodne cijevi te položaj i tip predturbinskog zatvarača.

Kad je strojarnica nadzemna, transformatori su smješteni ispred ili iza nje a rasklopna postrojenja nižeg napona u posebnoj zgradici. Komanda je uvjek u produženju glavne hale.

Kad je strojarnica podzemna, transformatori su u glavnoj hali ili u posebnoj kaverni. Predturbinski zatvarači mogu biti unutar strojarnice (sl. 33) ili u posebnoj kaverni paralelno duljoj osi strojarnice. Da se raspon strojarnice ne bi morao povećati a da zatvarači ostanu unutar zgrade, tlačni se dovod do turbine dovodi i pod kutom manjim od 90° prema duljoi osi strojarnice (sl. 34).

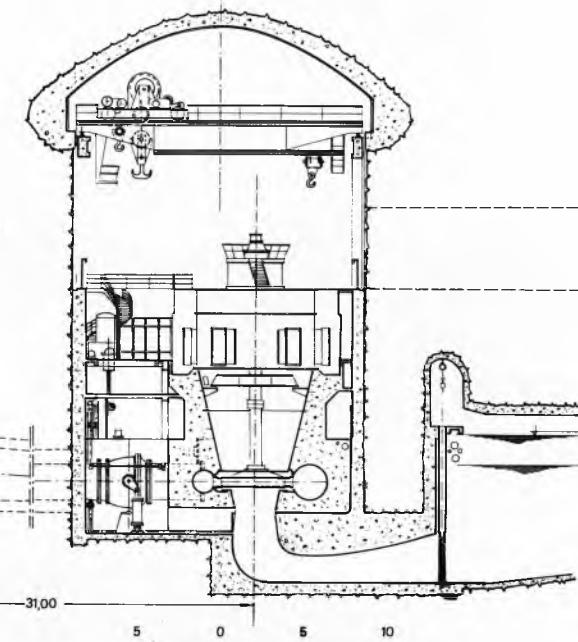
Kaverna za transformatore nalazi se uz pristupni tunel ili odvojeno. Smješta se što bliže generatorima da se omogući spoj golin vodičima.

Nosivost glavne dizalice u strojarnici ovisi o težini rotora, a visina od poda do kraja o potrebnom prostoru za njegov prijenos prilikom montaže i remonta.

U sklopu strojarnice nalazi se i difuzorski zatvarač koji omogućava pražnjenje i kontrolu difuzora. Smještaj zatvarača (u hali, izvan nje ili u posebnom tunelu) u podzemnim strojarnicama ovisi o duljini difuzora. Kroz tunel zatvarača difuzora odvodi se zrak iz odvodnog gravitacijskog tunela.

Nosač krana gradi se od armiranog betona ili čelika. Temelj generatora izrađuje se kao armiranobetonски stol ili čelični cilindar (s betonskom oblogom ili bez nje) koji teret generatora neposredno prenosi na građevnu konstrukciju.

Strojarnica ima sustav drenaže koji osigurava od eventualne poplave prostorije ispod razine donje vode. Bunar za drenažne pumpe nalazi se obično između agregata.



Sl. 34. Dispozicija podzemne strojarnice HE Jablanica. 1 dovodni tunel, 2 dovodni tunel, 3 i 4 vodne komore, 5 preljevna komora vodne komore, 6 tlačne cijevi, 7 komora predturbinskih zatvarača, 8 strojarnica, 9 montažni plato, 10 komanda, 11 pristupni tunel, 12 vanjsko rasklopno postrojenje 110 kV, 13 odvodni tuneli

HIDROELEKTRANE

Podzemne strojarnice moraju biti dobro klimatizirane da se spriječi kondenzacija vlage na strojevima i aparatom.



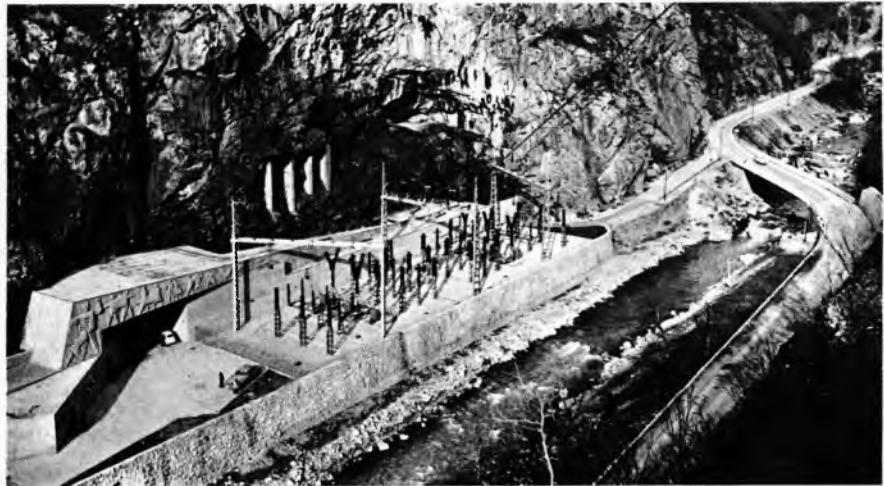
Sl. 35. Unutrašnji izgled podzemne strojarnice HE Dubrovnik s pogledom prema komandi

u koritu rijeke ili u odvodnom kanalu. Ako je tunel dug, a protok velik ili se razina vode u koritu znatno mijenja, voda otjeće pod tlakom, pa je potrebna donja vodna komora koja se dimenzionira na istim principima kao i gornja. Gornji dio donje vodne komore povezan je s atmosferom, i to obično kroz pristupni tunel. Brzine vode u odvodnom tunelu iznose 2...3 m/s. Tlačni su tuneli obično obloženi radi smanjenja hravavosti. Na kraju tunela moraju se predviđjeti vodilice za postavljanje pomoćnih zatvarača i uređaji za njihovo podizanje da bi se kanal mogao pregledati i popraviti. Ako je odvod gravitacijski, oblaže se samo protjecajni profil, a tjeme se tunela osigurava, kad je potrebno, sidrima i poinčanom mrežom ili torkretom. Slobodni profil iznad maksimalne razine mora biti toliki da se ne zaguši valovima pri otvaranju turbina. Od utjecaja morskih valova odvodni tuneli zaštićuju se posebnom konstrukcijom izlazne građevine (sl. 38) ili zaštitnim valobranom (sl. 39).

S obzirom na nizak položaj ovih tunela u usporedbi s razinom podzemne vode, treba uvijek očekivati poteškoće. Od podzemnog smještaja strojarnice HE Orlovac moralio se odustati zbog relativno velikog i stalnog priliva podzemne vode u pristupnom i u odvodnom tunelu.

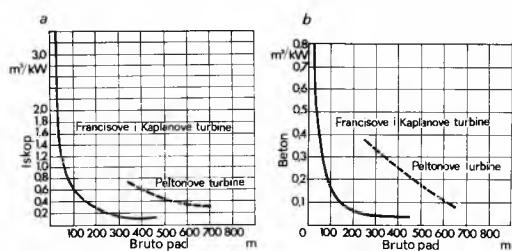


Sl. 36. Portali na ulazu u podzemne strojarnice. Lijevo portal u HE Jajce I sa zaštitnom maskom i pristupni tunel sa zaštitnim svodom protiv prokopljivanja, rebrima, nosačima i indirektnom rasvjetom; desno portal u HE Rama s izvodima 220 kV. Reljef na portalu je rad kipara Kockovića i predstavlja razvoj narodnooslobodičke borbe i bitku na Neretvi. Portal je zaštićen od eventualnog rušenja blokova



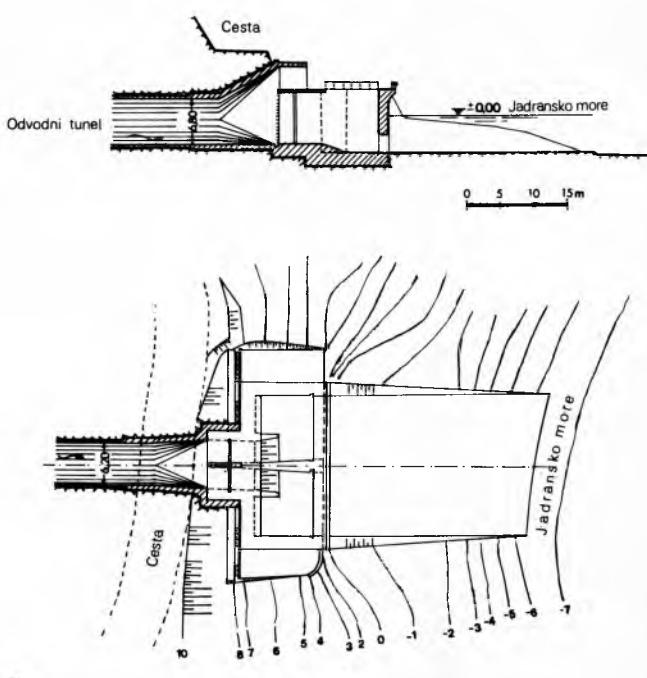
Unutrašnjost strojarnice (sl. 35) i portali na ulazu u pristupni tunel (sl. 36) često su uspjela arhitektonска ostvarenja. Kabeli za vezu s dalekovodima vode se kroz posebni tunel koji služi i za ventilaciju ili kao izlaz za nuždu.

Iskop za podzemne hidroelektrane (sl. 37a) i volumen betona (sl. 37b) po jedinici snage ovise o padu i o tipu turbinе.



Sl. 37. Specifični iskop (a) i specifični utrošak betona (b) u m^3/kW snage ovisni o padu podzemnih strojarnica izgrađenih u SFRJ

Odvod iz strojarnice. Nadzemne strojarnice nalaze se uz rijeku; iz turbina voda otjeće neposredno u korito rijeke ili kanalom ako je strojarnica udaljena od obale. Kanal se gradi kao u niskotlačnim hidroelektranama iako ima potpuno obloženih kanala kad nema poteškoća s podzemnom vodom. Iz podzemnih hidroelektrana voda se odvodi tunelom koji završava



Sl. 38. Izlazna građevina odvodnog tunela HE Senj — zaštita od morskih valova

Tablica 3

VISOKOTLAČNE HIDROELEKTRANE U SFRJ SNAGE VEĆE OD 20 MW

Ime	Rijeka	Q_i m ³ /s	Bruto pad m	P_i MW	W_{srgod} GWh	Početak pogona
1	2	3	4	5	6	7
<i>Pribranski tip</i>						
Peruća	Cetina	120,0	55,5	41,6	132,0	1960.
Kokin Brod	Uvac	43,0	73,0	25,0	55,0	1962.
Bajina Bašta I	Drina	600,0	65,5	320,0	1621,0	1966.
Trebinje I	Trebišnjica	210,0	105,0	162,0	500,0	1968.
Tikveš	Crna reka	120,0	101,2	88,0	207,0	1968.
Šipilje	Crni Drim	90,0	92,5	66,0	384,0	1969.
Sklope	Lika	45,0	69,5	22,5	85,0	1969.
Piva	Piva	240,0	185,8	360,0	860,0	1976 (P)
Bočac	Vrbas	240,0	64,0	110,0	307,0	u grad.
Sjenica	Uvac	36,0	90,0	22,0	50,0	u grad.
<i>Derivacijski tip</i>						
Kraljevac	Cetina	70,0	110,0	68,0	90,0	1913.
N. Tesla (Vinodol)	Ličanka-Lokvarka	15,0	660,0	89,0	160,0	1952 (P)
Vrla I	Vlasina	16,0	343,0	44,8	40,0	1955.
Vrla II	Vrla	17,0	158,0	21,4	25,0	1955.
Vrla III	Vrla	16,8	206,6	25,6	44,0	1957.
Vrla IV	Vrla	16,0	170,9	20,8	35,0	1957.
Jajce I	Pliva	60,0	98,5	50,0	230,0	1957 (P)
Gojak	Dobra i Mrežnica	50,0	133,5	48,0	190,0	1958.
Raven	Vrutočka reka	32,0	72,5	19,2	45,0	1959.
Bistrica	Lim	36,0	376,4	104,0	316,0	1960.
Perućica	Sliv Zete	59,5	537,4	252,0	1130,0	1960.
Zakućac I	Cetina	100,0	270,0	216,0	1660,0	1961. I faza (P) II faza u grad. (P)
Senj	Lika i Gacka	60,0	436,5	216,0	1080,0	1965.
Globočica	Crni Drim	50,0	108,0	42,0	200,0	1965.
Dubrovnik	Trebišnjica	90,0	295,0	214,0	1560,0	1965 (P)
Rijeka Orlovac	Rječina	21,0	228,3	37,0	150,0	1967 (P)
PAHE Čapljina	Sliv Cetine	70,0	403,0	225,0	850,0	1972.
	Trebišnjica	225,0	227,0	430,0	1400,0	1978 (P)
<i>Kombinirani tip</i>						
Moste	Sava	38,0	67,5	20,0	60,0	1952 (P)
Jablanica	Neretva	180,0	111,0	150,0	720,0	1955 (P)
Vrutok (Mavrovo)	Sliv Radike	32,0	557,0	150,0	325,0	1957 (P)
Rama	Rama	64,0	325,0	160,0	681,0	1968 (P)
PAHE Bajina Bašta II	Rzav	63,0	610,0	297,0	1057,0	u grad.

(P) podzemna strojarnica



Sl. 39. Objekti pred ulazom u strojarnicu HE Dubrovnik kod Mlina sa zaštitnim nasipom na izlazu odvodnih tunela i lukom

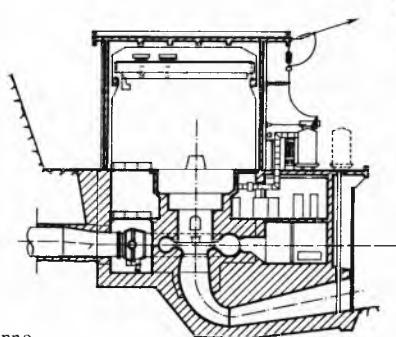
PUMPNO-AKUMULACIJSKE HIDROELEKTRANE

Da bi stupanj djelovanja postrojenja bio što bolji, teži se da dovod i odvod vode budu što kraći. Volumeni gornjeg i donjeg akumulacijskog bazena moraju biti dovoljni da mogu primiti vodu u turbinskom i pumpnom pogonu. Najčešće u takvim postrojenjima nema prirodnog dotoka u gornji akumulacijski bazen.

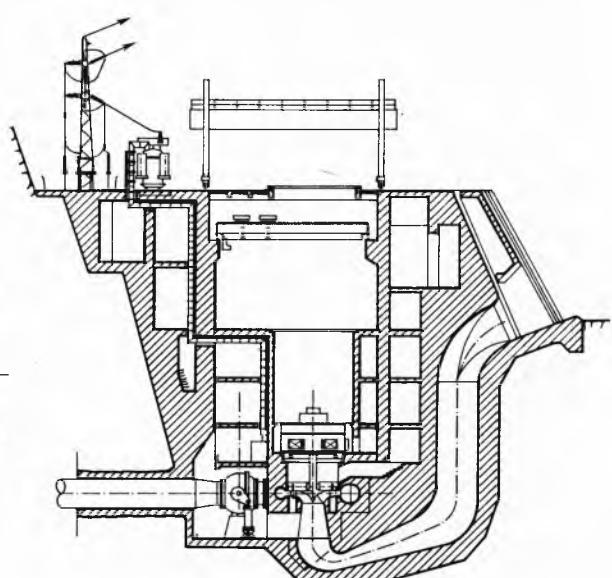
Ima postrojenja, međutim, koja imaju prirodnji dotok u gornji bazen. Volumen toga bazena tada ovisi i o dotoku. Donji bazen tada služi i kao kompenzacijski.

Dovodni tunel takvih postrojenja oblikuje se kao u običnim hidroelektranama, ali su brzine u tunelu obično veće, pogotovo kad postrojenje ne radi dulje od 2000 sati godišnje. Strojarnice su nadzemne ili podzemne. Za pumpno-akumulacijske hidroelektrane potrebne su veće dimenzije strojarnice nego za obične hidroelektrane (sl. 40). Upotreba reverzibilnih pumpa-turbina zahtijeva niži smještaj agregata da se sprječi pojавa podtlaka. Ako je strojarnica podzemna, kaverna je iz istih razloga vrlo visoka (70...90m), pa se pojavljuju poteškoće osiguravanja od utjecaja horizontalnih sila. To se postiže prednapregnutim sildrima a nekada su potrebne i betonske grede u razini poda kao razupore.

Ako se voda odvodi tunelom koji je ujedno i dovodni tunel, krajnji dio ima oblik lijevka. Tunel je dublje položen



3x120 MW obične turbine



3x120 MW reverzibilne turbine

Sl. 40. Profil strojarnice obične i pumpno-akumulacijske hidroelektrane jednakih snaga u turbinskom pogonu (vanjska izvedba)

0 5 10 15 20 25 30 35 40 m

nego u običnim hidroelektranama, pa se u nepovoljnim uvjetima prije bušenja mora dio po dio masiva oko profila injektirati. Zbog velikih protoka tuneli su redovno pod tlakom pa je potrebna donja vodna komora.

LIT.: *W. Creager, J. Justin*, Hydroelectric handbook, John Wiley, London 1958. — *H. Addison*, A treatise on applied hydraulics, Chapman and Hall Ltd, Aberden 1964. — *H. Varlet*, Turbines hydrauliques et groupes hydroélectriques, Eyrrolles, Paris 1964. — *E. Mosonyi*, Wasserkraftwerke, I i II dio, VDI-Verlag, Düsseldorf 1966. — *R. Giocchio*, Aménagements hydroélectriques, Eyrrolles, Paris 1970. — *Ф. Губин*, Гидроэлектрические станции, Энергия, Москва 1972. — *G. Hutterew*, Technische Hydraulik, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1973. — *S. Mikulec*, Iskorištanje vodnih snaga, I i II dio, Građevinski fakultet, Sarajevo 1975.

S. Mikulec

HIDROGENACIJA (hydrogeniranje, hidriranje), katalitička reakcija (v. Kataliza) nekog spoja ili proces koji obuhvaća više katalitičkih reakcija neke smjese spojeva s vodikom (v. Vodik). Ponekad se o hidrogenaciji govorí kao o redukciji (v. Oksidacija i redukcija), ali se obično pod redukcijom vodikom razumijevaju nekatalitičke reakcije.

Prema tome, hidrogenacija obuhvaća nepregledno mnoštvo procesa, počevši od sasvim jednostavnih reakcija, kao što je već od 1823. poznato izgaranje vodika na zraku u prisutnosti platinse spužve, pa do suvremenih industrijskih, vrlo složenih procesa preradbe materijala komplikiranog sastava u kojima se istovremeno odvijaju reakcije vodika s mnogo spojeva, pri čemu mnogi od njih reagiraju i na više načina. Cjelovito obuhvatiti to područje nije ni izdaleka moguće, pa je opisivanje hidrogenacije nužno ograničeno na najvažnija područja njene primjene (u sintezi ugljikovodika, u proizvodnji ugljikovodika iz ugljena i njegovih prerađevina, preradbi biljnih i životinjskih ulja i masti), izuzevši oplemenjivanje nafta i njenih prerađevina (v. Nafta). O drugim područjima industrijske primjene hidrogenacije jednako, a možda, barem zasad, i više važnim od nekih od spomenutih, u praksi se obično ne govorí kao hidrogenaciji; obično se ona promatruju odvojeno, npr. hidroformilacija (tzv. oksosinteza, v. Aldehydi, TE1, str. 190), sinteza metanola (v. Alkoholi, TE1, str. 215), reduktivna aminacija (v. Amini, TE1, str. 267) i sinteza amonijaka (v. Dušik, TE3, str. 494).

Već šezdesetih godina prošlog stoljeća bilo je pokušaja izvođenja hidrogenacije. Hidrogenacijom ugljena pomoću nascentnog vodika nastalog raspadom jodovodika u zatljenoj cijevi na 270°C dobio je M. Berthelot 1869. smjesi ugljikovodika sličnu naftu. Međutim, prve znatne uspjehe u hidrogenaciji u plinskoj fazi postigli su tek P. Sabatier i J. B. Senderens tridesetak godina kasnije. Svojim radovima u vremenu od 1897. do 1902. oni su već pokazali utjecaj nikalnih katalizatora na hidrogenaciju ugljik(II)-oksid, dobivajući pri tome uglavnom samo metan. Skoro u isto vrijeme mnogi su autori (među njima S. Fokin, C. Paal, R. Willstätter) već pokušavali hidrogenirati niz kapljevitih organskih tvari u prisutnosti suspendiranih katalizatora u tim tvarima.

Ta su istraživanja omogućila W. Normannu do te mjeru tehnički dojerano izvođenje hidrogenacije nezasićenih spojeva u mastima i masnih kiselina, da je on za to već 1902. izradio patent. Razmjerno brzo poslije toga, 1905., njegovim postupkom prvi put je u tehničkom mjerilu dobivena biljna mast iz ulja u jednom postrojenju u Engleskoj.

Iste godine pokazao je V. N. Ipatrijević da vodik pod tlakom u velikoj mjeri utječe na pirolizu organskih spojeva. Kasnije su mnogi istraživači pokušavali hidrogenirati naftu i ugljen najprije nascentnim, a zatim molekularnim vodikom. Istodobno su mnogi istraživači, najviše u tvrtki BASF (jer je ta tvrtka u to doba već raspolažala priličnim iskustvom u tehniči sinteza s vodikom pod velikim tlakom, stečenim radom na sintezi amonijaka), pokušavali ostvariti sintezu ugljikovodika hidrogenacijom ugljen-monoksid. U tim istraživanjima prve vrlo dobre uspjehe postigao je F. Bergius već 1910., kad je uspio krekovati naftu, i 1913., kad je uspio dobiti kapljevite ugljikovodike iz ugljena, oboje pod velikim tlakom vodika i na visokim temperaturama. Također 1913. uspjela je i sinteza ugljikovodika u BASF, danas poznata i pod imenom Fischer-Tropschova sinteza (prema F. Fischeru i H. Tropschu koji su zaštitnični za njenu komercijalizaciju).

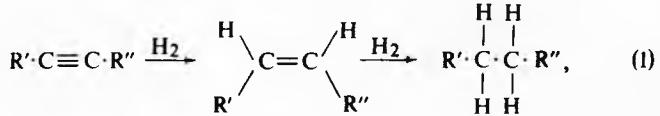
Istraživanja koja su slijedila ubrzo su omogućila izradbu niza industrijskih postupaka hidrogenacije. Sve veća potražnja proizvoda preradbe nafta uzrokovala je i sve širi primjenu tih postupaka u oplemenjivanju te sirovine i njenih prerađevina i njihov dalji razvoj sve do danas. I primjena hidrogenacije za proizvodnju masti i niza tehničkih proizvoda iz masnih ulja neprekidno se širila i usavršavala zbog sve veće potrošnje (najviše u prehrambene svrhe, posebno za proizvodnju margarina, mnogo i za dobivanje zasićenih masnih kiselina i masnih alkohola za proizvodnju detergenata). Zbog viših cijena proizvoda industrijska proizvodnja kapljevitih goriva sintezom ugljikovodika i hidrogenacijom ugljena dosada nije mogla konkurirati

industriji preradbe nafta u normalnim uvjetima. Njen dosadašnji razvoj uvjetovan je krizama u opskribi sirovom naftom. Najviše se to osjetilo u Evropi, posebno u Njemačkoj za vrijeme drugog svjetskog rata. Njemačka proizvodnja kapljevitih ugljikovodika tim postupcima, osobito goriva za motore, bila je u to doba vrlo velika. Vrlo je vjerojatno da će u bliskoj budućnosti ovi postupci opet postati važna baza proizvodnje ugljikovodika, a neki postupci i kapljevitih goriva, najviše zbog toga što iscrpljenje prirodnih izvora nafta nije daleko.

Reakcije hidrogenacije mogu biti reakcije adicije vodika na nezasićene veze ugljikovih atoma (adicija hidrogenacija), reakcije u kojima dolazi do vezivanja vodika i na atome drugih elemenata u molekulama organskih spojeva (reduktivna hidrogenacija) i reakcije kidanja međuatomskih veza u molekulama vodikom (hidrogenoliza).

Adicija hidrogenacija. Najvažnije reakcije ove skupine obuhvačaju hidrogenaciju alkina, alkena, dienskih i trienskih alifatskih, te aromatskih ugljikovodika i nekih derivata tih spojeva.

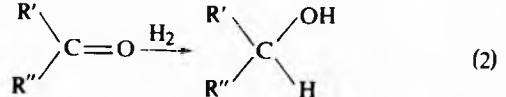
Hidrogenacija alkina u biti je proces prikazan kemijskim jednadžbama



gdje su R' i R'' atomi vodika ili neki organski radikalni. Ona, dakle, obuhvaćaju hidrogenaciju alkena, koja je u tehničkim procesima obično nepoželjna. Većinom se pri hidrogenaciji alkina u tehniči želi postići što veći selektivitet (što veća proizvodnja alkena i što manja proizvodnja alkana). Jedan takav važan slučaj jest uklanjanje etina iz plinovitih proizvoda kringinga nafta i njenih derivata selektivnom hidrogenacijom.

Reakcije adicije vodika na nezasićene veze lanca ugljikovih atoma važne su za proizvodnju različitih masti iz biljnih i životinjskih ulja i zasićenih masnih kiselina iz nezasićenih. Posebno su važne reakcije selektivne hidrogenacije dienskih i trienskih lanaca triglicerida u odgovarajuće im monoenske lance.

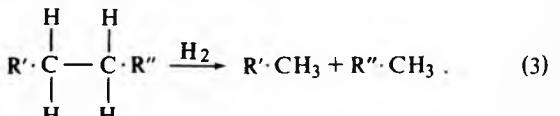
Redukcijska hidrogenacija. Najvažnije od ovih reakcija jesu reakcije karbonilne skupine. One se mogu prikazati reakcijom jednadžbom



To su reakcije redukcije ketona u sekundarne, odnosno aldehida u primarne alkohole, važne u mnogim sintezama, npr. viših alkohola (v. Alkoholi, TE1, str. 217).

Promatra li se ugljik(II)-oksid kao najjednostavniji karbonilni spoj, već spomenuta sinteza metanola i barem neke od reakcija sinteza drugih alkohola hidrogenacijom ugljik(II)-oksid također se mogu ubrojiti u ovu skupinu reakcija.

Hidrogenoliza. Najvažnije reakcije hidrogenolize jesu reakcije cijepanja veze među ugljikovim atomima vodikom. Najjednostavniji takav slučaj jest hidrogenoliza lančastih ugljikovodika, koja se može prikazati jednadžbom



Pri tome nastaju manje, postojanje molekule, bogatije vodikom, preferabilno metan, pa je najčešći proces hidrogenolize ugljikovodika demetilacija. U tu skupinu reakcija mogu se ubrojiti također i važne reakcije alifatizacije alicikličkih i aromatskih spojeva vodikom. Otvaranje prstena pri hidrogenolizi aromatskih spojeva često je popraćeno i reakcijama adicija hidrogenacije.

Reakcije cijepanja veza među ugljikovim atomima vodikom vrlo su važne u procesima hidrogenolitičke razgradnje ugljena, asfalta, nafta i njihovih prerađevina.