

opravljene po pravilih VDI z nekaterimi izjemami, ki so jih narekovala posebne okoliščine pri nas, predvsem takratna težka energetska situacija zaradi nizkih voda.

Glavni namen meritev je bil, da bi se prepričali, ali dejanska poraba toplote ustreza navedbam v garanciji dobavitelja. Če ne bi ustrezala, bi imela elektrarna pravico do odškodnine. Obenem so bile kontrolirane tudi druge navedbe dobavitelja o tehničnih lastnostih turbin. Slednjič je dobila s tem elektrarna najzanesljivejše podatke o delovanju stroja v rednem pogonu.

Na vsaki turbini so bile opravljene po štiri meritve, in sicer pri 30, 26, 19,5 in 10 MW. Za merjenje veličin, iz katerih se računa specifična poraba toplote, so bili uporabljeni samo instrumenti z atesti. Za ostale meritve so bili uporabljeni laboratorijski instrumenti in le v majhni meri obratni. Skupaj je bilo okrog 30 instrumentov. Število mernih mest je bilo tako veliko zaradi kontrole delovanja regenerativnega gretja. Posameznih odčitkov po instrumentih je bilo nad 10 000.

Izračun porabe toplote je pokazal, da dejanska poraba toplote ni v nobenem primeru presegla garantiranih vrednosti, v povprečju pa je bila pri agregatu II za 0,46 % in pri agregatu I za 1,91 % (abs.) manjša od garantirane. Večji del razlike med obema agregatoma gre na račun tega, da je imel ob času meritev kondenzator II štiri mesece službe več kakor kondenzator I in pred preizkusom nista bila očiščena. Izkoristek turbinskega dela postrojenja, ki je razmerje med proizvedeno električno energijo in entalpijsko razliko pare od vstopa v turbino do izstopa iz

zadnjega grelnika, je bil v povprečju za oba agregata 36 %. Kako se je spreminjal z močjo, pa kaže sl. 4.

Posebej sta bila preizkušena regulacija in delovanje hitrostnih varoval. Regulacija je pri nenadnih razbremenitvah turbin delovala brezhibno in je ostala najvišja dosežena vrtilna hitrost še vedno v varni razdalji od števila vrtiljajev, pri katerem izklopi hitrostno varovalo. Pred razbremenitvami poskusi so bila preskušena še hitrostna varovala, in sicer v prostem teku z ročnim povečevanjem vrtilne hitrosti.

Prevezni poskusi so potrdili, da obe turbinski postrojenji glede delovanja povsem ustrezata dogovorjenim pogojem.

PRIMERJAVA Z DRUGIMI POSTROJENJI

Vrednost tega turbinskega postrojenja se še posebej pokaže, če primerjamo izkoristke posameznih postrojenj pri nas in pa dviganje povprečnega izkoristka parnih turbinskih postrojenj naših javnih elektrarn.

Izkoristki posameznih parnih turbinskih postrojenj so bili po meritvah Inštituta za strojno tehnične meritve univerze v Ljubljani takile:

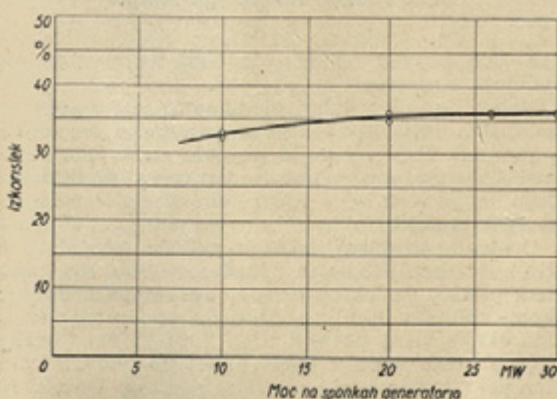
Agregat	Moč MW ekon./maks.	Para ata/°C	Izkori- stek %	Opomba
Velenje	—/7,5	17/360	18	preračunano iz meritev na parnem kotlu
Brestanica I	8/12,5	35,5/400	27	preračunano iz meritev na parnem kotlu
Trbovlje I	16/24	35,5/400	26,9	dela brez regen. gretja napajalne vode
Trbovlje II	16/20	36/440	30,4	dela brez regen. gretja napajalne vode
Šoštanj I	26/30	95/505	36,2	dela z regen. gretjem napajalne vode
Šoštanj II	26/30	95/505	36,0	dela z regen. gretjem napajalne vode

Povprečni izkoristek na osnovi enakega popolnega izkoriščanja vseh obratujočih javnih parnih turbinskih postrojenj v Sloveniji skupaj se je z vključevanjem novih enot večal takole:

od osvoboditve do 1. 1955	23 %
1. 1956: 1. Trbovlje — turbina III	27 %
2. Šoštanj — turbina II	28 %
3. Šoštanj — turbina I	29 %
1. (?) (Šoštanj — turbina III)	(32 %)

Ti dve kratki primerjavi kažeta, kolikšen napredek je bil dosežen v preteklem letu in kolikšen je še možen v ekonomičnem izkoriščanju energije goriv z uvajanjem modernih parnih turbinskih postrojenj pri nas.

Avtor: doc. ing. Boris Cernigoj, Oddelek za strojništvo elektrostrojne fakultete v Ljubljani.



Sl. 4. Izkoristek turbinskega postrojenja v odvisnosti od moči (brez odvzema pare za termično pripravo vode)

DK 621.175.3(497.12)

Hladilni stolp TE Šoštanj

ZORAN RANT

Hladilni stolp TE Šoštanj je največji objekt te vrste v naši državi. Projektirali in gradili so ga čisto sami domači strokovnjaki in delavci z uporabo samega domačega materiala. Od ostalih večjih v naši državi zgrajenih stolpov se razlikuje po velikosti za cel veličinski red in spada tudi v svetovnem merilu med velikane.

V stolpu se hladi topla hladilna voda iz kondenzatorjev obeh turbin (2×30 MW) za ponovno uporabo. Stolp je v celoti zgrajen iz mineralnih materialov. Luska in nosilna konstrukcija pršišča sta iz ojačenega betona, pršišče in razdelilni kanali za vodo so pa iz salonita. Kar se tiče uporabe salonitnih plošč za pršišče, je ta stolp drugi na svetu.

Karakteristične veličine stolpa so:

premer v pršišču D	47,5 m
višina H	60,0 m
izmenjalna površina A	220 000 m ²
količina vode Q	13 000 m ³ /h
hladilni interval $\Delta \theta_v$	8 deg
natok vode Q/A	7,3 m ³ /m ² h

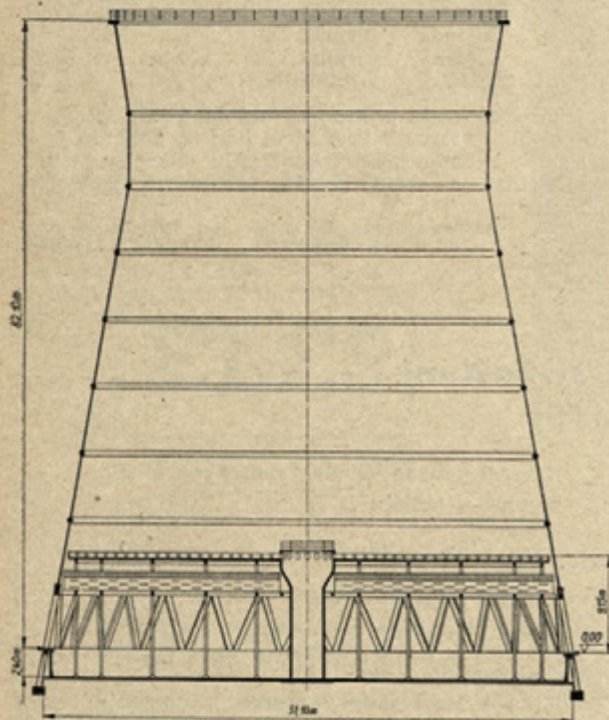
Hladilni interval je razlika med temperaturama tople in ohlajene vode.

Slika 1 kaže stolp v prerezu. Znamenitost tega stolpa je pršišče, ki je sestavljeno iz vertikalnih plošč debeline 5 mm. Sistem pršišča je prikazan na sliki 2. Hladilna voda se razdeljuje enakomerno po tlorisu

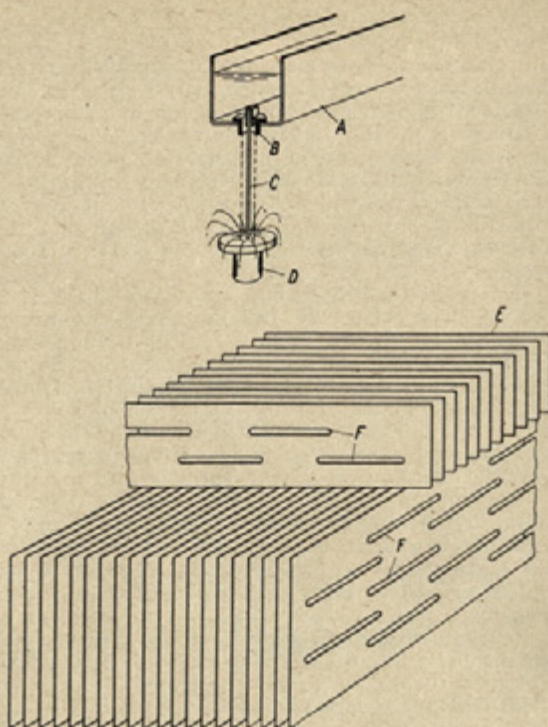
stolpa po salonitnih žlebovih, v katerih so keramični iztočni dulci B. Vodni curek iz dulca pada na razpršilni krožnik D, ki je koncentrično obešen v dulcu na debeli žici C (patent prijavljen). Te žice so edini kovinski deli vsega stolpa. V kapljice razpršena voda se lovi enakomerno porazdeljena na salonitnih ploščah E. Te plošče so razvrščene v dveh plasteh, ki sta postavljeni pravokotno druga na drugo. Ob ten ploščah polzi navzdol tenka plast vode (film), v kanalih med ploščami pa teče navzgor, torej protitočno z vodo, zrak. Sistem plošč tvori aktivni del hladilnega stolpa. Tu prihaja voda na veliki površini ($A = 220\,000\text{ m}^2$) v dotik z zrakom, pri čemer se prenašajo iz vode v zrak toplota in vodni hlapi. Izmenjavo toplote in snovi pospešujejo rege F v salonitnih ploščah, ki v zračnem toku ustvarjajo vedno na novo razmere tako imenovane naletne proge (jug. patent 18 299). Pri pretoku skozi pršišče se zrak segreje in nasiči z vlago in postane tako redkejši od zraka okolice. Prazni del stolpa med pršiščem deluje kot kamin (dimnik) in ustvarja zaradi različnih gostot segretega zraka in zraka okolice vlek, ki je potreben za pretok zraka.

Ko sem leta 1953 prevzel od investitorja nalogo, izračunati dimenzije stolpa in dati navodila za njegovo konstrukcijo, sem se znašel v zelo zanimivem položaju: za računsko zasledovanje izmenjave toplote in snovi ob raznih površinah je bila na voljo dobro izdelana teorija (2,4), toda nikjer ni bilo mogoče najti zanesljivih podatkov za empirične koeficiente, ki se morejo vstaviti v obrazce te teorije. Zanesljive so bile dalje metode za izračunavanje vleka, ki ga daje kamin določene višine; niso pa bili dosegljivi nobeni podatki o izgubah vleka, ki nastajajo pri pretoku zraka skozi hladilni stolp, n. pr. pri vstopu v stolp, v dežju pod pršiščem, v pršišču samem in pri pretoku skozi razpršilni in razdelilni sistem.

Literatura o hladilnih stolpih je pičila in se skrbno ogiba uporabljivih podatkov, saj je gradnja hladilnih stolpov tako rekoč monopol majhnega števila velikih tvrdk, ki jim iz razumljivih razlogov ni niti najmanj do tega, da bi svoje računske metode objavljale za



Sl. 1. Prerez skozi hladilni stolp TE Šoštanj



Sl. 2. Pršišče hladilnega stolpa

druge. Vrh tega se mi zdi, da tudi tu v veliki meri prevladuje empirika.

Naloga se mi je takoj predstavila kot tipičen problem »pomanjkljivih podatkov« (problème des données manquantes). Ker v tehniki pogosto zadevamo na podobne situacije, bo morebiti zanimivo prebrati naslednjo kratko razlago, kako sem se lotil naloge in kako sem jo rešil.

Centralni problem stolpa je pršišče. Obstajata dve vrsti pršišč: kapljčasto in filmsko pršišče. Pri kapljčastem pršišču se razbija voda, dokler je v dotiku z zrakom, stalno v kapljice, tako da je izmenjalna površina enaka vsoti površin vseh kapljic. Pri filmskem pršišču pa teče voda v tanki plasti po podlogi; izmenjalna površina je enaka površini podloge. Odločil sem se za filmsko pršišče, ker je tu izmenjalna površina definirana in je tudi izračun izgub pri vleku v njem lažje izvedljiv.

Investitor je pokazal popolno razumevanje za položaj in je ugodil mojim zahtevam, naj se osnovni problemi najprej raziščejo v laboratorijih na modelih. Vendar je bil čas za izračunavanje in projektiranje odmerjen zelo pičlo, tako da je bilo možno izvesti le nekaj bolj kontrolnih preizkusov.

Omočene površine se lahko izdelujejo iz lesa ali salonitnih plošč. Ker s salonitom nismo imeli do tedaj nobenih izkušenj v hladilnih stolpih, so bile izvršene raziskave v Zavodu za raziskovanje gradbenega materiala in konstrukcij v Ljubljani in v laboratoriju prof. Kavčiča na Tehniški fakulteti v Ljubljani. Ker so dale te raziskave ugodne rezultate, se je investitor odločil za salonit. S tem sem bil v celoti sporazumen, saj sem že leta 1950 predlagal, naj se pršišče hladilnega stolpa v Brestanici opremlja s salonitno garnituro. V zavodu za preiskavo materiala smo nadalje na dveh izsekih pršišča v naravni velikosti študirali enakomernost razdelitve vode po florisu in tako dognali najugodnejšo obliko in najboljši položaj razpršilnih krožnikov. Opazovali smo tok vodnega filma po leseni ozir. salonitni podlogi in tvorbo vodnih curkov na spodnjem robu plošč. O tem je posnet tudi osemmilimetrski film.

Iz teh preizkusov in opazovanj sem črpal dragocene podatke za geometrijo pršišča in razdelilnega sistema ter o gostoti dežja pod pršiščem. V Vodogradbenem inštitutu v Ljubljani so merili izgube vleka v pršišču na sistemu salonitnih plošč naravne velikosti. Izgube vleka so proporcionalne kvadratu hitrosti zraka; zato mora krivulja izgub, nanesenih nad hitrostjo, biti parabola z vrhom v koordinatnem začetku. Izgube vleka so merjene za tri hitrosti; skozi eksperimentalno določene točke položena parabola pa ne gre skozi ničlo. Kje je napaka, nismo mogli dognati. Rezultati meritev pa so bili kljub temu koristni, ker sem mogel z njimi oceniti največjo verjetno vrednost koeficienta proporcionalnosti.

V literaturi sem našel nekaj merilnih podatkov za manjši hladilni stolp s filmskim pršiščem (3). Te podatke sem ustrezno preračunal in iz njih izluščil konstanto za izračunanje koeficienta izmenjave snovi. Konstanto sem nato primerjal z meritvami v nekih aparatih kemične industrije, kjer tečejo podobni procesi kakor v pršiščih hladilnih stolpov (1). Primerjava je pokazala zadovoljivo skladnost in s tem potrdila uporabnost koeficienta.

Na tej razmeroma pičli osnovi sem moral graditi dalje. Potrebno je bilo:

a) izdelati metodo za izračunanje površine pršišča; to je bilo mogoče s pomočjo že izdelane teorije (2,4) in koeficienta za izmenjavo snovi:

b) določiti izgube vleka pri pretoku zraka skozi hladilni stolp. To so izgube pri vstopu v stolp, izgube pri pretoku skozi »deževno« cono pod pršiščem, izgube v pršišču, izgube v razdelilnem in razpršilnem sistemu, izgube v kaminu in izstopne izgube.

Za izračunanje izgub pri vleku nisem imel tako rekoč nobenih številčnih podatkov. Zanesti sem se moral na ocenitev na podlagi bodisi nekih modelov ali pa razumnih predpostavk. Tako sem za računanje nadomestil dež pod priščem s tankimi valji ali palicami, a velikost izgub pri vleku sem ocenil s formulo, ki služi pri parnih kotlih za pretok dimnih plinov navpično na cevne registre (n. pr. v kotlih sistema Babcock-Wilcox). Izgube v prišču sem izračunal oslanjaje se na meritve v hidravličnem inštitutu itd.

S tako sestavljenim matematičnim aparatom sem se lotil dimenzioniranja stolpa. V tem problemu se pojavljajo tele spremenljivke:

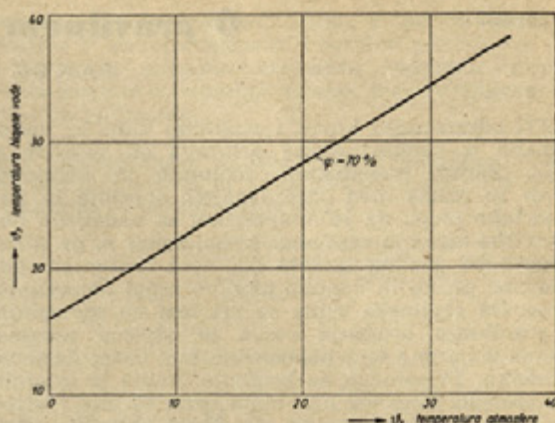
izmenjalna površina	A
premer stolpa	D
višina stolpa	H
količina zraka	Z
hitrost zraka	w
koeficient izmenjave snovi	α

Konstante so:

stanje atmosfere:	temperatura	$\theta_z = 15^\circ \text{C}$
	vlaga	$\varphi = 70\%$
količina vode		$Q = 13\,000 \text{ m}^3/\text{h}$
temperatura vode pri vstopu		$\theta_1 = 33^\circ \text{C}$
temperatura vode pri izstopu		$\theta_2 = 25^\circ \text{C}$

Ker so spremenljivke deloma tudi odvisne med seboj, je rešitev problema precej zamotana in možna samo grafično. Med geometričnimi veličinami A , D in H je pa tehnično možnih veliko število kombinacij. Rezultat teh kombinacij so toplotno enakovredni stolpi povsem različnih višin in premerov in z različno velikimi izmenjalnimi površinami.

Iskati se mora najgospodarnejša rešitev. Gospodarstvenost je odvisna od investicij in obratovalnih stroškov, ki so pri hladilnih stolpih predvsem stroški pumpanja vode na višino razdelilnega sistema. Da bi izbral najbolj ekonomično obliko stola, sem izračunal po devet različnih kombinacij. A, D in H za lesena in salonitna pršišča. Ta primerjava je pokazala, da je salonitno pršišče povrh večje, tako rekoč neomejene trajnosti tudi sicer gospodarnejše od lesenega. Hladilni stolpi s takim pršiščem so veliko nižji kakor stolpi



Sl. 3. Temperatura hladilne vode v odvisnosti od temperature atmosfere

z lesenim; tudi je višina pumpanja vode v stolpih s salonitnim pršiščem manjša kakor v stolpih z lesenim pršiščem.

S pomočjo te primerjave sem izbral končne dimenzije stolpa. Za ta stolp sem izračunal verjetne obratovalne pogoje za različne temperature zraka in dobil krivuljo, ki je narisana na sliki 3.

Dosedanja opazovanja kažejo, da deluje stolp nekoliko bolje, kakor je bilo predvideno.

Hladilni stolpi so zelo važni deli energetskih naprav; gospodarstvenost in zmogljivost termoelektrarn sta precej odvisni od pravilnega delovanja stolpov. To delovanje pa je treba stalno in vestno kontrolirati. Investitor je razumel ta problem in je naročil za hladilni stolp lepo število instrumentov. Ti instrumenti pa še niso v celoti vgrajeni. Šele ko bodo vsi vgrajeni, bo možno stolp pravilno negovati in tudi njegovo delovanje oceniti dokončno.

Hladilni stolp TE Sostanj pa ni samo toplotno zanimiv aparat; prav tako zaslužita pozornost njegova gradbena konstrukcija in izvedba. Popolnoma se strinjam z običajem, da se tudi pri najmanjšem literarnem ali glasbenem delu ob vsaki izvedbi navaja ime avtorja. Ne razumem pa, zakaj izginjajo imena mož, ki ustvarjajo s svojim znanjem in tudi pogumom in z lastno odgovornostjo nadvse pomembna tehnična dela, skoraj dosledno za anonimnimi nazivi gradbenih in drugih tehničnih podjetij. Zato bodi tukaj povedano, da je to gradbeno konstrukcijo projektiral in za njeno izvedbo zamislil novo, nadvse elegantno metodo ing. Tine Obrnan ob Elektroprojekta v Ljubljani.

Zahvaljujem se investitorju, podjetju Elektroprojekt in tovarišem iz komisije za revizijo projektov LRS za zaupanje, ki so ga imeli v moje račune.

Literatura:

1. Carey, W. F. in Williamson, G. J.: Gas Cooling and Humidification: Design of Packed Towers from Small-scale Tests, The Institution of Mechanical Engineers, Steam Group, Proceedings 1950, Vol. 163, str. 41—52.
2. Koch, J.: Untersuchung und Berechnung von Kühlwerken mit Hilfe des i,t- Bildes, VDI — Forschungsheft 404, 1940.
3. Werner, W.: Ein Hochleistungskühlturm aus Eisenbeton, Archiv für Wärmewirtschaft, 1929, str. 37—43.
4. Wood, M. A. in Betts, P.: A Contribution to the Theory of Natural Draught Cooling Towers, kakor (1), str. 54—64.

Avtor: prof. dr. ing. Zoran Rant, Oddelek
za strojništvo elektro-strojne fakul-
tete v Ljubljani.