

UDK 697.329:697.7:697.8

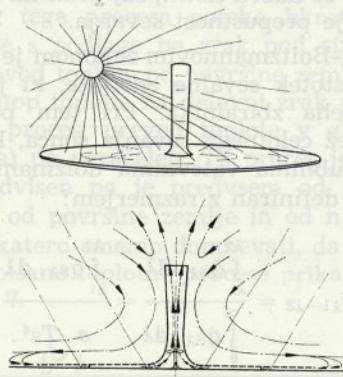
Sončni dimnik

IGOR KUŠTRIN — MATIJA TUMA

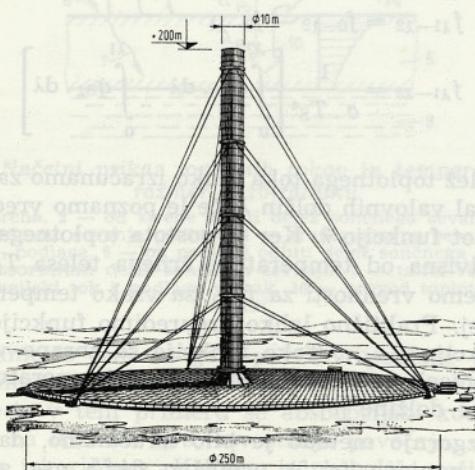
DELOVANJE SONČNEGA DIMNIKA

Sončni dimnik spreminja sončno energijo v električno z novo kombinacijo že dolgo znanih učinkov tople grede, dimnika in vetrnice.

V osnovi gre za okrogli kos ravne zemeljske površine s premerom več sto metrov, ki je pokrita s prozorno streho, postavljeno približno meter nad zemljo. V sredini te pokrite površine stoji visok dimnik, v njegovem spodnjem delu sta vgrajena enostopenjska aksialna turbina, podobna mlinski vetrnici, in elektrogenerator. Zaradi sončnega sevanja se zrak pod prozorno streho segreva: od odprtga krožnega roba proti središču nastane močan zračni tok, ki doseže v dimniku velike hitrosti. Kinetična energija tega zračnega toka se nato v turbinskem stroju — brez vmesnega topotnega procesa — spremeni neposredno v mehansko oz. električno energijo (sl. 1).

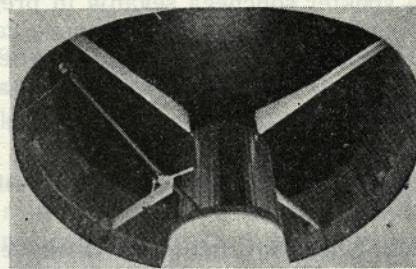


Sl. 1. Delovanje sončnega dimnika



Sl. 2. Prototip postroja v kraju Manzanares v Španiji

Čeprav izhaja ideja iz leta 1931 [1], je bil tak postroj prvič uresničen šele v novejšem času: v kraju Manzanares v Španiji so Nemci pred kratkim postavili prvi tak postroj [2], [3] (sl. 2 in 3), pri



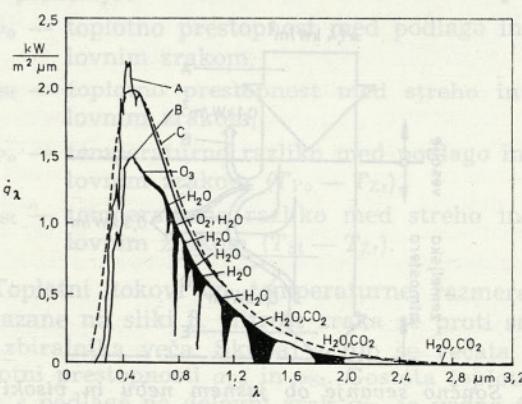
Sl. 3. Vetrnica v podnožju dimnika

čemer so nekaj izmerkov že objavili, večina meritve pa še teče. Meritve naj bi na eni strani pokazale upravičenost in gospodarnost pogona ter na drugi strani potrdile nekatere računske domneve.

Na tem mestu je prikazan preprost računski model in so opisane najpomembnejše zakonitosti, ki morajo biti izpolnjene, da tak postroj deluje [4]. Te zakonitosti so seveda dobro znane, tu gre le za njihovo prilagoditev razmeram, ki vladajo pri kombinaciji tople grede, dimnika in vetrnice.

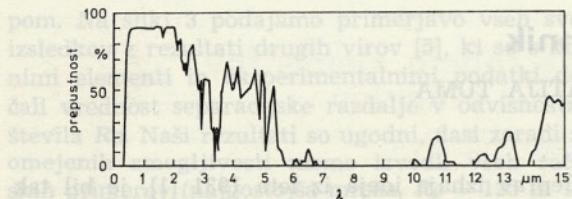
TOPLA GREDA ALI ZBIRALNIK TOPLOTE

Naloga tople grede ali sončnega zbiralnika toplote je, da segreva zrak na temperaturo, ki omogoča zadosten vlek v dimniku. Prozorna streha zbiralnika mora biti narejena iz materiala, ki prepušča kratkovalnovno sevanje sonca ter hkrati zadržuje dolgovalnovno sevanje podlage. Na slikah 4 in 5 sta



Sl. 4. Spektralna porazdelitev intenzivnosti sončnega sevanja

A — sončno sevanje na robu zemeljskega ozračja, B — sončno sevanje na morski gladini, C — sevanje črnega telesa pri 5900 K



Sl. 5. Prepustnost 0,125 mm debele ponjave iz poliestra za sončne žarke

prikazana spekter sončnega sevanja in prepustnost prozorne ponjave iz poliestra za sončne žarke [5], [2]. Iz obeh slik je razvidno, da so valovne dolžine sončnega spektra v področju, kjer ponjava sončne žarke zelo dobro prepušča.

Gostota toplotnega toka sončnega sevanja, ki pade na zbiralnik toplote

Stefan-Boltzmannov zakon pravi, da je gostota toplotnega toka, ki ga seva črno telo, enaka:

$$\dot{q}_S = \int_{\lambda=0}^{\infty} \dot{q}_{S\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \sigma \cdot T_S^4 \quad (1)$$

kjer pomenijo:

$\dot{q}_{S\lambda}(\lambda)$ — gostoto sevanja črnega telesa pri valovni dolžini λ ,

σ — Stefan-Boltzmannovo konstanto,

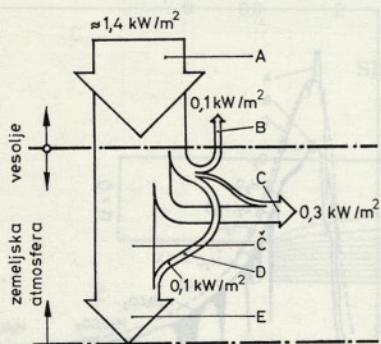
T_S — absolutno temperaturo črnega telesa.

Gostota toplotnega toka, ki ga sponce seva na vse strani, je potem takem

$$\dot{q}_S = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5750 = 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$$

pri čemer je bila za temperaturo T_S vzeta temperatura, pri kateri poteka na soncu fuzija vodika v helij.

Ce vzamemo, da je polmer sonca $r_S \approx 7 \cdot 10^8 \text{ m}$ in povprečna razdalja med soncem in zemljo $l \approx 1490 \cdot 10^8 \text{ m}$, potem lahko izračunamo gostoto toplotnega toka \dot{q}_Z , ki pride do roba zemeljskega ozračja:



Sl. 6. Sončno sevanje ob jasnom nebu in visoki legi sonca, pravokotno na zemeljsko površino

A — sončno sevanje na robu zemeljskega ozračja, B — izgube zaradi razsipa, — C — izgube zaradi absorpcije, — D — neposredno sončno sevanje, E — difuzno sevanje neba, F — sončno sevanje, ki pride do zemeljske površine

$$\dot{Q}_S = 4 \cdot \pi \cdot r_S^2 \cdot \dot{q}_S = 4 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \dot{q}_Z \quad (2)$$

$$\dot{q}_Z = \left(\frac{r_S}{l} \right)^2 \cdot \dot{q}_S = \left(\frac{7 \cdot 10^8}{1490 \cdot 10^8} \right)^2 \cdot 6,2 \cdot 10^7 = 1360 \text{ W/m}^2$$

To številčno vrednost potrjujejo tudi novejše satelitske meritve [6], [7]. Izgube od roba zemeljskega ozračja do površine zemlje pa znašajo $\approx 400 \text{ W/m}^2$ [5] (sl. 6), tako da lahko ocenimo gostoto sevanja na zemeljsko površino pri resnično idealnih razmerah okrog 1000 W/m^2 . Dejanske vrednosti so precej nižje, okrog 600 W/m^2 , odvisno pač od zemljepisne širine in od klimatskih razmer.

Prepuščnost strehe zbiralnika toplote

Za učinkovito delovanje sončnega postroja je ključnega pomena, da je material za streho pravilno izbran:

— prepuščati mora čimveč sončne energije predvsem v območju valovnih dolžin, kjer je sončno sevanje najmočnejše,

— biti mora poceni, saj gre za površino več sto kvadratnih metrov,

— biti mora obstojen proti vetru in dežju in

— mora se dobro čistiti, saj prah na strehi močno zmanjšuje prepuščnost sevanja.

S Stefan-Boltzmannovim zakonom je mogoče izračunati odstotek sevalne energije, ki jo prepušča izbrana streha zbiralnika. Pri tem potrebujemo najprej delež celotnega sevanja sonca, ki leži med dvema poljubnima valovnima dolžinama λ_1 in λ_2 . Ta delež je definiran z razmerjem:

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \dot{q}_{S\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{\infty}^{\lambda_2} \dot{q}_{S\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \dot{q}_{S\lambda} \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T_S^4} \quad (3)$$

Integral v imenovalcu je mogoče izraziti z dvema integraloma, ki se oba začneta pri $\lambda = 0$:

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = f_{0-\lambda_2} - f_{0-\lambda_1}$$

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{1}{\sigma \cdot T_S^4} \left[\int_0^{\lambda_2} \dot{q}_{S\lambda} \cdot d\lambda - \int_0^{\lambda_1} \dot{q}_{S\lambda} \cdot d\lambda \right] \quad (4)$$

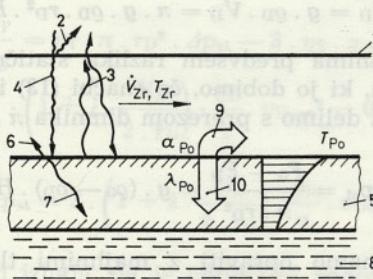
Delež toplotnega toka lahko izračunamo za vsak interval valovnih dolžin λ , če le poznamo vrednosti $f_{0-\lambda}$ kot funkcijo λ . Ker je gostota toplotnega toka $\dot{q}_{S\lambda}$ odvisna od temperaturo črnega telesa T_S , potrebujemo vrednosti za $f_{0-\lambda}$ za vsako temperaturo posebej. Praktično lahko preuredimo funkcijo $f_{0-\lambda}$ v funkcijo $f_{0-\lambda} \cdot T$. Take funkcije so zbrane v razpredelnicah in so uporabne za vse temperature in valovne dolžine [8].

Z zgornjo metodo je bilo izračunano, da prepušča ponjava (sl. 5) približno 84 % vse sončne energije, ki pade na streho zbiralnika [4]. Skušati

je seveda treba najti v prihodnje materiale za streho kolektorja, ki bi prepuščali še več sončnega sevanja. S tem bi se izboljšal skupni izkoristek postroja.

Temperatura podlage

V prejšnjem odstavku je bila določena gostota toplotnega toka, ki pride do podlage zbiralnika. Podlaga absorbira toplotni tok, ki pade nanjo v skladu s svojo absorpcijsko zmožnostjo. Če je podlaga črna, npr.: zemlja, premazana z asfaltom, potem je absorpcijski koeficient visok in znaša 0,93. Skoraj vsa sevalna energija se absorbira in se spremeni v toploto. Podlagi se ustrezno zviša temperatura. Ta podlaga zopet seva v skladu s Stefan-Boltzmannovim zakonom $\dot{q}_{P_0} = \epsilon_{P_0} \cdot \sigma \cdot T_{P_0}^4$. Zaradi razmeroma nizke temperature T_{P_0} gre za dolgovolovno sevanje, ki ga streha zelo malo prepušča; za izbrano ponjavijo iz poliestra znašajo te izgube $\approx 8\%$. Izračunane so bile na enak način kakor pre-pustnost sevanja skozi streho zbiralnika. Večina sevalne energije se torej na ponjavi odbije in vrne do podlage, ki jo zopet absorbira. Ta proces se ne-neno ponavlja. Podlaga torej v vsakem naslednjem trenutku sprejema poleg sončne energije še svojo lastno emitirano in od ponjave odbito energijo. Poleg tega procesa poteka hkrati tudi prestop toplotne s podlage na zrak pod streho zbiralnika in prevod toplotne od površine zemlje v globlje plasti. Prestop toplotne na delovni zrak (konvekcija) je zaželen proces, prevod toplotne v globlje plasti (kondukcija) pa nezaželen. Ta proces je lahko zelo škodljiv, odvisen pa je predvsem od oddaljenosti talne vode od površine zemlje in od njene temperatur, za katero smemo domnevati, da ostaja konstantna. Opisane toplotne procese prikazuje shematično slika 7.



Sli. 7. Načelni prikaz toplotnih tokov in temperaturnih razmer v zbiralniku

1 — streha, 2 — od strehe odbiti delež sončnega sevanja, 3 — dolgovolovno sevanje podlage, 4 — kratkovolovno sevanje sonca, 5 — podlaga, 6 — od podlage odbiti delež sončnega sevanja, 7 — absorbirani delež sončnega sevanja, 8 — talna voda, 9 — konvekcijski tok s podlage v zrak, 10 — prevod toplotne v globino

Namesto črne in gole površine podlage je mogoče imeti posebej negovanzo zeleno površino (»toplo gredo«); v tem primeru se absorpcijski koeficient zniža na 0,71 do 0,79, investicije povečajo, vendar so tla izkorisčena. Kakšna je najboljša rešitev za tla zbiralnika, bo pokazala prihodnost.

Izkoristek zbiralnika toplote

Pri izkoristku sončnega dimnika sta med drugim pomembna tako imenovana trenutni in dnevni izkoristek zbiralnika.

Trenutni izkoristek je definiran kot razmerje sončne energije, ki pade na zbiralnik in se v istem trenutku porabi za segrevanje zraka Q_K , in celotne sončne energije, ki pade na površino zbiralnika A_K :

$$\eta_{Kt} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{q}_s \cdot A_K} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{q}_s \cdot (r_K^2 - r_D^2) \cdot \pi} \quad (5)$$

Toplotni tok, ki se takoj uporabi za segrevanje zraka pod streho zbiralnika \dot{Q}_K , sestoji iz toplotnega toka \dot{Q}_{P_0} , ki prestopa s podlage na delovni zrak, in toplotnega toka \dot{Q}_{St} , ki prestopa s strehe zbiralnika na delovni zrak. Zrak pod streho zbiralnika se zato segreje od temperature okolice T_0 do končne temperature T_D , s katero vstopa v dimnik:

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{P_0} + \dot{Q}_{St} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_D - T_0) \quad (6)$$

$$\eta_{Kt} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_D - T_0)}{\dot{q}_s \cdot (r_K^2 - r_D^2) \cdot \pi} \approx \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_D - T_0)}{\pi \cdot r_K^2 \cdot \dot{q}_s} \quad (7)$$

Nadalje velja za okrogli zbiralnik:

$$\dot{Q}_{P_0} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_K}^{r_D} \dot{q}_{P_0}(r) \cdot r \cdot dr \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{St} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_K}^{r_D} \dot{q}_{St}(r) \cdot r \cdot dr \quad (9)$$

pri čemer pomenita \dot{q}_{P_0} in \dot{q}_{St} gostoti toplotnih tokov, ki tečeta s podlage zbiralnika in s strehe zbiralnika na delovni zrak, r_K zunanji polmer zbiralnika in r_D polmer dimnika. Velja: $r_K \gg r_D$. Gostoti toplotnih tokov sta opisani z enačbama:

$$\dot{q}_{P_0}(r) = a_{P_0}(r) \cdot \Delta T_{P_0}(r) \quad (10)$$

$$\dot{q}_{St}(r) = a_{St}(r) \cdot \Delta T_{St}(r) \quad (11)$$

kjer pomenijo:

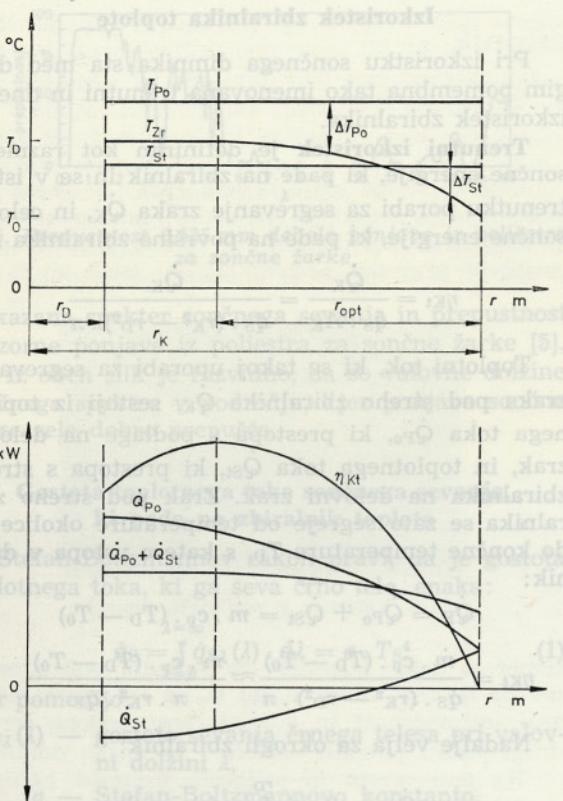
a_{P_0} — toplotno prestopnost med podlago in delovnim zrakom,

a_{St} — toplotno prestopnost med streho in delovnim zrakom,

ΔT_{P_0} — temperaturno razliko med podlago in delovnim zrakom ($T_{P_0} - T_{Zr}$),

ΔT_{St} — temperaturno razliko med streho in delovnim zrakom ($T_{St} - T_{Zr}$).

Toplotni tokovi in temperaturne razmere so prikazane na sliki 8. Hitrost zraka se proti središču zbiralnika veča. Skupaj z njo se večata tudi toplotni prestopnosti a_{P_0} in a_{St} . Gostota toplotnega toka s podlage na delovni zrak \dot{q}_{P_0} je vedno pozitivna, ker temperatura zraka nikoli ne doseže temperature podlage: $T_{Zr} < T_{P_0}$. V grobem smemo domnevati, da je temperatura podlage konstantna.



Sl. 8. Temperaturne razmere in toplotni tokovi v odvisnosti od polmera zbiralnika

Theoretično se ta temperatura proti središču malo znižuje, ker tam delovni zrak zaradi večje hitrosti, tj. boljše toplotne prestopnosti odvaja večji toplotni tok [3]. Drugače se dogaja pri toplotnem prestopu s strehe na delovni zrak. Temperatura strehe je na zunanjem robu le nekoliko višja od temperaturе okoliškega zraka T_0 , ki vstopa v zbiralnik. Na neki razdalji se temperaturi izenačita, in sicer zaradi toplotnega toka, ki prihaja s podlage. Od tod naprej se smer tega toplotnega toka obrne in delovni zrak začne oddajati energijo v okolico; hkrati pa jo še vedno sprejema od podlage.

Na določeni razdalji od roba zbiralnika se pojavi ravnotežje: vso energijo, ki jo delovni zrak sprejme od podlage, oddaja v okolico. Temperatura zraka se ne povečuje več. Razdalja, na kateri dosegne delovni zrak najvišjo temperaturo, ustreza optimalnemu polmeru zbiralnika r_{opt} . V tej točki je dosežen največji mogoči izkoristek.

Dnevni izkoristek je definiran kot razmerje sončne energije, ki dnevno pada na zbiralnik, in energije, ki se v 24 urah prenese na delovni zrak:

$$\eta_{KD} = \frac{Q_{KD}}{\dot{q}_{sa} \cdot A_K} \quad (12)$$

kjer pomenita:

Q_{KD} — toplotni tok, ki v 24 urah preide na delovni zrak,

\dot{q}_{sa} — toplotni tok, ki pada na $1 m^2$ strehe zbiralnika v času od sončnega vzhoda do sončnega zahoda.

Dnevni izkoristek je vedno večji od trenutnega, kajti ponoči se del energije, ki jo absorbira podlaga, vrača delovnemu sredstvu. Pri postavitvi postroja je torej treba izbrati teren, ki ima veliko zmogočnost skladitvenja toplotne energije.

Energija, ki prodre v zemljo, mora tam tudi ostati. Teren, ki ima blizu površine talno vodo, ni primeren, saj vodni tok stalno odnaša del absorbitane toplotne. Pri ugodni izbiri terena je mogoče, da v zemlji vskladiščena energija omogoča pogon vetrnice še po sončnem zahodu, vendar se moč sčasoma močno zmanjšuje [2].

DIMNIK IN VETRNICA

Vzgon v dimniku

V dimniku nastane vzgon zaradi razlike gostot zraka v dimniku in tistega zunaj dimnika. Tu imamo opravka s toplim zrakom, pri običajnih dimnikih pa z dimnimi plini, ki imajo tudi sicer višjo temperaturo kakor pa v zbiralniku segreti zrak. Arhimedov zakon pravi, da je sila, ki nasprotuje teži potopljenega telesa, enaka teži izpodrinjene tekočine. V našem primeru je sila, ki nasprotuje teži toplega zraka v dimniku, enaka:

$$F_0 = g \cdot \varrho_0 \cdot V_D = \pi \cdot g \cdot \varrho_0 \cdot r_D^2 \cdot H_D \quad (13)$$

Tej sili vzgona nasprotuje teža toplega zraka v dimniku:

$$F_D = g \cdot \varrho_D \cdot V_D = \pi \cdot g \cdot \varrho_D \cdot r_D^2 \cdot H_D \quad (14)$$

Nas zanima predvsem razlika statičnih tlakov v dimniku, ki jo dobimo, če enačbi (13) in (14) odstejemo in delimo s prerezom dimnika $\pi \cdot r_D^2$:

$$\Delta p_{st} = \frac{F_0 - F_D}{\pi \cdot r_D^2} = g \cdot (\varrho_0 - \varrho_D) \cdot H_D \quad (15)$$

Ker imamo opraviti z majhnimi tlačnimi in temperaturnimi razlikami, lahko domnevamo, da gre za idealni plin: $\varrho_0 \cdot T_0 = \varrho_D \cdot T_D$. Končni rezultat za tlačno razliko (vzgon) v dimniku je:

$$\Delta p_{st} = g \cdot \varrho_D \cdot \left(\frac{T_D - T_0}{T_0} \right) \cdot H_D \quad (16)$$

Del te tlačne energije se v dimniku spremeni v kinetično energijo, del pa se porablja za premagovanje trenja [9]:

$$\Delta p_{st} = \left(1 + \lambda \cdot \frac{H_D}{2 \cdot r_D} \right) \cdot \frac{\varrho_D \cdot v_{Dst}^2}{2} \quad (17)$$

V trenutku, ko vstavimo v dimnik vetrnico, se pojavi dodatni padec tlaka. Ta tlačna razlika omogoča pridobivanje dela v vetrnici, ki žene generator. Imamo:

$$\Delta p_{st} = \Delta p_T + \Delta p_v + \Delta p_{tr} = \Delta p_T + \frac{\rho_D \cdot v_D^2}{2} + \lambda \cdot \frac{H_D}{2 \cdot r_D} \cdot \frac{\rho_D \cdot v_D^2}{2} \quad (18)$$

pri čemer pomenijo:

Δp_T — delež statične tlačne razlike, ki se v turbini spremeni v električno energijo,

Δp_v — delež statične tlačne razlike, ki se spremeni v kinetično energijo,

Δp_{tr} — delež statične tlačne razlike, ki se porablja za premagovanje trenja,

v_D — hitrost toplega zraka v dimniku,

λ — koeficient trenja pri pretoku zraka skozi dimnik.

Moč vetrnice

Ni vseeno, kakšno vetrnico postavimo v dimnik. Čim večji je padec tlaka čez turbinu, tem manjši je prostorninski pretok zraka skozi dimnik. To spoznanje je zelo pomembno, kajti v enačbi za izračun moči vetrnice se pojavlja njun zmnožek:

$$P_T = \eta_T \cdot \dot{V}_D \cdot \Delta p_T = \eta_T \cdot \pi \cdot r_D^2 \cdot v_D \cdot \Delta p_T \quad (19)$$

Ekstrem enačbe za moč vetrnice P_T dobimo, če izračunamo njen odvod po hitrosti v_D in ga izenacimo z nič:

$$P_T = \eta_T \cdot \pi \cdot r_D^2 \cdot v_D \cdot \left[\Delta p_{st} - \left(1 + \lambda \cdot \frac{H_D}{2 \cdot r_D} \right) \cdot \frac{\rho_D \cdot v_D^2}{2} \right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial P_T}{\partial v_D} = \eta_T \cdot \pi \cdot r_D^2 \cdot \Delta p_{st} - 3 \cdot \eta_T \cdot \pi \cdot r_D^2 \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{H_D}{2 \cdot r_D} \right) \cdot \frac{\rho_D}{2} \cdot v_D \cdot v_{Dopt}^2 = 0 \quad (21)$$

$$\Delta p_{st} = 3 \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{H_D}{2 \cdot r_D} \right) \cdot \frac{\rho_D}{2} \cdot v_{Dopt}^2 \quad (22)$$

Od tod izhaja, da je optimalni padec tlaka čez vetrnico

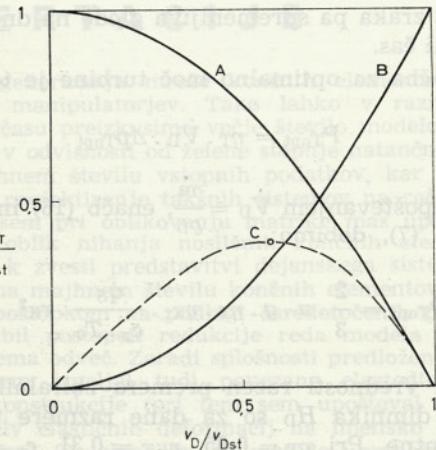
$$\Delta p_{Topt} = \frac{2}{3} \cdot v_{Dst} \quad (23)$$

Hitrost zraka pri optimalnem padcu tlaka čez vetrnico pa

$$v_{Dopt} = \left(\frac{1}{3} \right)^{1/2} \cdot \Delta p_{st} \quad (24)$$

Zgornje enačbe so prikazane grafično v diagramu na sliki 9. Krivulja A pomeni brezdimenzijski padec tlaka čez vetrnico po enačbi:

$$\frac{\Delta p_T}{\Delta p_{st}} = 1 - \left(\frac{v_D}{v_{Dst}} \right)^2 \quad (25)$$



Sl. 9. Reducirani padec tlaka čez turbinu v odvisnosti od reducirane hitrosti zraka skozi dimnik

Kadar je padec tlaka čez vetrnico največji oziroma enak celotni statični razliki tlakov v dimniku, tedaj je hitrost zraka enaka nič (»dimnik je zaprt s ploščo«).

Krivulja B pomeni brezdimenzijski delež tlaka, ki se spremeni v hitrost in se porablja za premagovanje trenja:

$$\frac{\Delta p_v + \Delta p_{tr}}{\Delta p_{st}} = \left(\frac{v_D}{v_{Dst}} \right)^2 = 1 - \frac{\Delta p_T}{\Delta p_{st}} \quad (26)$$

Kadar je padec tlaka čez vetrnico enak nič, takrat je hitrost zraka največja mogoča, vsa statična tlačna razlika se spremeni v kinetično energijo (»v dimniku ni ničesar«).

Nazadnje kaže krivulja C brezdimenzijsko moč vetrnice:

$$\frac{P}{P_{st}} = \frac{\Delta p_T}{\Delta p_{st}} \cdot \frac{v_D}{v_{Dst}} = \frac{\Delta p_T}{\Delta p_{st}} \cdot \left(\frac{\Delta p_v + \Delta p_{tr}}{\Delta p_{st}} \right)^{1/2} \quad (27)$$

P_{st} je statična električna moč. To je pojem, ki v praksi ni mogoč. Dobili bi jo, če bi hkrati izkoristili Δp_T , ki bi bil enak Δp_{st} , in hitrost zraka v_D , ki bi bila enaka v_{Dst} . Ker to ni mogoče, si lahko samo prizadevamo, da se tej električni moči čim bolj približamo. To se zgodi v točki, kjer se pojavljata Δp_{Topt} in v_{Dopt} ; veljati mora:

$$\frac{P}{P_{st}} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{3} \right)^{1/2} = 0,385$$

Za izbiro vetrnice imamo sedaj vse podatke, ki jih potrebujemo: optimalni padec tlaka čez vetrnico Δp_{Topt} in optimalno hitrost zraka v_{Dopt} . Od tod je mogoče določiti premer dimnika in s tem premer rotorja vetrnice. Ker imamo opravka z velikimi masnimi pretoki in majhnimi tlačnimi padci, že preprost račun pokaže, da pride v poštev predvsem aksialna vetrnica, ki mora imeti nastavljen naklon-ski kot lopatic: specifična vrtilna hitrost je velika,

hitrost zraka pa spremenljiva glede na dnevno uro in letni čas.

Enačba za optimalno moč turbine je torej:

$$P_{\text{Topt}} = \eta_T \cdot \dot{V}_D \cdot \Delta p_{\text{Topt}} \quad (28)$$

Z upoštevanjem $\dot{V}_D = \frac{\dot{m}}{\rho_D}$, enačb (16) in (23) ter enačbe (7), dobimo:

$$P_{\text{Topt}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot g \cdot \eta_T \cdot \eta_{KT} \cdot \frac{\dot{q}_S}{c_p \cdot T_0} \cdot r_K^2 \cdot H_D \quad (29)$$

Vse vrednosti razen premera zbiralnika r_K in višine dimnika H_D so za dane razmere približno konstantne. Pri $\eta_T = 0,85$, $\eta_{KT} = 0,31$, $c_p = 1000 \text{ J}/(\text{kg K})$, $T_0 = 300 \text{ K}$ in $\dot{q}_S = 550 \text{ W/m}^2$ dobimo:

$$P_{\text{Topt}} \approx 0,01 \cdot r_K^2 \cdot H_D \quad (30)$$

Optimalna moč vetrnice je potem takem odvisna od polmera zbiralnika in od višine dimnika. Višine dimnika pa seveda ni moč višati čez vse meje, prav tako je glede na prejšnje izvajanje določen optimalni premer zbiralnika.

SKLEP IN NADALJNJI RAZVOJ

Pridobivanje koristne energije s turbino, ki jo žene vzgonski zrak v tako imenovanem sončnem dimniku, je malo raziskano področje.

Tu so bile v grobem prikazane zakonitosti delovanja takega toplotnega postroja, za natančnejše preračune je treba počakati na izmerke [4], ki potekajo na doslej edinem že zgrajenem prototipu [2]. Prvi objavljeni izmerki kažejo ugodne rezultate [3], čeprav postroj ni dimenzioniran optimalno.

Ker se skupni izkoristek izboljšuje z večanjem velikosti postroja, je treba računati z zelo velikimi enotami: za električno moč 10 MW je na primer potreben premer zbiralnika približno 3,4 km in višina dimnika 350 m, enačba (30). Turbinski stroj (navpična, enosna aksialna turbina, zasidrana v vznožju dimnika) ne pomeni velikega tehničnega problema, prav tako je tehnično mogoče zidati visoke dimnike. Težave lahko povzroča izbira terena in še posebej material in konstrukcija ogromnega zbiralnika.

Gledano v celoti pomeni sončni dimnik prav gočovo rešitev, ki jo je v prihodnje vredno tehnično in gospodarsko temeljito obdelati.

SIMBOLI

A — površina (m^2)

c_p — specifična toplota pri $p = \text{konst}$ (J/kg K)

F — sila (N)

$g = 9,81$ — zemeljski pospešek (m/s^2)

| | |
|-----------------|---|
| H | višina (m) |
| l | razdalja (m) |
| m | masni pretok (kg/s) |
| p | tlak ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$) |
| P | moč (W) |
| \dot{q} | gostota toplotnega toka (W/m^2) |
| Q | toplotni tok (W) |
| r | polmer (m) |
| T | temperatura (K, $^{\circ}\text{C}$) |
| v | hitrost (m/s) |
| V | prostornina (m^3) |
| V | prostorninski tok (m^3/s) |
| a | toplotna prestopnost ($\text{W/m}^2 \text{K}$) |
| Δ | razlika (—) |
| ε | emisijski koeficient sivega telesa (—) |
| η | izkoristek (—) |
| λ | koeficient trenja (—) |
| λ | valovna dolžina sevanja (m) |
| ρ | gostota (kg/m^3) |
| $\sigma = 5,67$ | Stefan-Boltzmannova konstanta ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$) |

INDEKSI

| | |
|-----------|-------------------------|
| d | dnevni |
| D | dimnik |
| K | zbiralnik toplote |
| opt | optimalni |
| O | okolica |
| Po | podlaga |
| S | sonce, sevanje |
| st | statični |
| St | streha |
| t | trenutni |
| tr | trenje |
| T | vetrnica |
| v | hitrost |
| Z | rob zemeljskega ozračja |
| Zr | zrak |
| λ | valovna dolžina sevanja |

LITERATURA

- [1] Mahlbacher, Th.: Technikgeschichtlicher Rückblick zu »Alternativen Energiequellen«, BWK 35 (1983), št. 12, str. 522—526.
- [2] Schlaich, J.: Aufwindkraftwerke, VGB Kraftwerkstechnik 62 (1982), št. 11, str. 926—930.
- [3] Schlaich, J.: Solar Chimneys, IABSE Periodica 3/1983, str. 45—60.
- [4] Kuštrin, I.: Sončni dimnik, Prešernova nagrada za leto 1984, Univerza v Ljubljani.
- [5] Kuczera, M.: Stand der Solartechnik, BWK 33 (1981), št. 3, str. 90—98.
- [6] Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik, Salle + Sauerländer, Frankfurt + Aarau, 1983.
- [7] Chauliaguet, Dh., P. Baratsabat, J. — P. Batellier: Solar Energy in Buildings. Wiley & Sons, Chichester, New York, 1979.
- [8] Siegel, R., J. R. Howell: Thermal Radiation Heat Transfer. McGraw Hill, New York, 1972.
- [9] Hampe, E.: Industrieschornsteine. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1970.

Naslova avtorjev: Igor Kuštrin, dipl. inž.

Avtomontaža, Vrhnika in prof. dr. Matija Tuma, dipl. inž., Fakulteta za strojništvo, Ljubljana