

protoni međusobnim sudarima stvaraju deuterone (jezgra vodonikovog izotopa deuterijuma), koji, u novim sudarima s protonima, proizvode helijum-3 (lakši izotop helijuma), da bi se u daljim procesima – u kojima još učestvuju helijum-4, berilijum-7, litijum-7 i bor-8 – na kraju dobio čist helijum-4 (tabela 1).

Tabela 1. Protonsko-protonski lanac

	$H^1 + H^1 \rightarrow D^2 + e^+ + \nu_e$	OSLOBOĐENA ENERGIJA
	$D^2 + H^1 \rightarrow He^3$	
	$He^3 + He^3 \rightarrow He^4 + 2H^1$	26,21 MeV
ili		
	$He^3 + He^4 \rightarrow Be^7$	
	$Be^7 + e^- \rightarrow Li^7 + \nu_e$	26,65 MeV
	$Li^7 + H^1 \rightarrow 2He^4$	
	ili	
	$Be^7 + H^1 \rightarrow B^8$	
	$B^8 \rightarrow Be^8 + e^+ + \nu_e$	19,1 MeV
	$Be^8 \rightarrow 2He^4$	
	$4H^1 \rightarrow 2He^4$	

U drugom procesu odlučujuću ulogu igra ugljenik. Ceo proces je dosta dug i složen. Vodonikova atomska jezgra – protoni, koji su slobodni jer se radi o plazmi – stupaju najpre u reakciju s jednim izotopom ugljenika, ugljenikom-12. Kao rezultat, dobija se azot-13, koji se radioaktivnim raspadanjem pretvara u ugljenik-13. Ovaj se, u sudaru s protonom, pretvara u drugi izotop azota, azot-14. Ponovo dolazi do sudara s trećim protonom, čiji rezultat je stvaranje kiseonika-15, koji je radioaktiv i pretvara se u azot-15. Po četvrti i poslednji put stupa proton u akciju i razbija ovaj izotop azota na dve čestice: ugljenik-12 i atomsko jezgro helijuma, helijum-4. Sumirajući ceo proces, vidimo da smo pošli od ugljenika-12, da su u akciju stupala četiri protona, a na kraju smo opet dobili ugljenik-12 te atomsko jezgro helijuma (tabela 2). Prema tome, čist

rezultat je pretvaranje četiri vodonikova jezgra, četiri protona, u jezgro helijuma. Ugljenik je samo potpomogao ceo proces, ali se sam nije promenio u krajnjoj liniji. U hemiji se često dešava da se neka hemijska reakcija lakše izvodi u prisustvu neke materije koja se, u krajnjoj liniji, sama ne menja. Takve se materije nazivaju katalizatorima. Ugljenik bi se, slično tome, u gornjem procesu mogao nazvati nuklearnim katalizatorom. Po njemu se ceo ovaj kružni proces na Suncu naziva ugljenični ili ugljenično-azotni lanac.

Tabela 2. Ugljenično-azotni lanac

$C^{12} + H^1 \rightarrow N^{13}$	OSLOBOĐENA ENERGIJA
$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu_e$	
$C^{13} + H^1 \rightarrow N^{14}$	25,03 MeV
$N^{14} + H^1 \rightarrow O^{15}$	
$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu_e$	
$N^{15} + H^1 \rightarrow C^{12} + Hr^4$	

U novije vreme došlo se do zaključka da na zvezdama veličine Sunca proton-protonski lanac predstavlja osnovni proces pretvaranja vodonika u helijum, dok je na masivnijim zvezdama važniji ugljenično-azotni lanac.

Jedno pitanje je sve dosada ostalo nerazjašnjeno: kako je prvi put počeo proces pretvaranja vodonika u helijum? Na koji način je prvobitno postignuta temperatura od 15 miliona stepeni i zašto se to nije dogodilo i na Zemlji?

Da bismo našli odgovor na ovo pitanje, moramo se vratiti u doba nastajanja Sunca, Zemlje i drugih planeta. Sunce je tada predstavljalo džinovski oblak gasova, čija je zapremina bila mnogo veća od današnje zapremine celokupnog Sunčevog sistema. Taj oblak se, usled delovanja sile gravitacije, vremenom koncentrisao oko jednog centra. Ovo sažimanje dovelo je do njegovog jakog zagrevanja, koje je u jednom momentu dostiglo temperaturu od nekoliko miliona stepeni, na kojoj su počele termonuklearne reakcije, a dalje se proces sam održavao.

Na Zemlji ovo nije moglo da se dogodi. Njena ukupna masa, pa prema tome i sila teže, 330 000 puta je manja od Sunčeve i stoga njeno sažimanje nije bilo dovoljno snažno da bi se postigla temperatura od više miliona stepeni. Pritisak u Zemljinom središtu iznosi samo milion atmosfera, pedeset hiljada puta manje od pritiska u Sunčevom. Štaviše, Zemljina gravitacija nije bila u stanju ni da zadrži lake gasove da ne pobegnu u vasionu. Tako je Zemlja ostala hladna i prepuštena milosti zrakova toplog i sjajnog Sunca. Ali su baš zato na njoj postojali uslovi za pojavu života, biljaka i životinja – i, najzad, za evoluciju čoveka, bića koje je, kako kaže jedan veliki fizičar, dovoljno razumno da postavlja pitanja o događajima koji su se zbili milijardama godina pre nego što se ono razvilo i koji se zbivaju milijardama kilometara daleko od Zemlje, kao i da nalazi odgovore na ta pitanja.

SUNČEVA BUDUĆNOST

Otići i ne vratiti se, to je najvrednije između svih događaja, ali sunce to ne umije. Možda mu nedostaje ljudska ludost. Popraviti se to više ne može, ali kad bi uspjelo kome onda bismo se sigurno sjetili da mu još nedostaje ljudska smrt.

Marija Čudina

Kao što smo rekli, znamo da Sunce sija približno kao sada već pet milijardi godina. Kao Zemljane, međutim, mnogo više nas interesuje odgovor na pitanje šta dalje. — Koliko se, zapravo, možemo pouzdati u Sunce?

Astrofizika danas dobro poznaje proces evolucije zvezda. Scenario daljeg razvoja Sunca izgleda ovako. Kada se istroši vodonik u Sunčevom jezgru, a to će se dogoditi kroz nekih pet milijardi godina, sila teže će moći da nastavi započeti rad na sažimanju mase. Zbog toga će temperatura u samom centru dostići 100 miliona kelvina, što će dovesti do „izgaranja“ vodonika u slojevima izvan jezgra. Posle desetak miliona godina, kad novooslobođena energija

dospē do površine Sunca, doći će do njegovog širenja, na stotine miliona kilometara u svim prvcima. Usled toga će ta ogromna gasna sfera početi da se hlađi i gubi sjaj, tj. da postaje sve crvenija. U stvari, Sunce će tada postati „crveni džin“.

U međuvremenu se njegovo jezgro i dalje sažima, i na temperaturi od preko 100 miliona stepeni dolazi do fuzije helijuma, što obezbeđuje da Sunce, kao crveni džin, sija još oko dve milijarde godina. Sunčev omotač se zatim pretvara u tzv. planetarnu maglinu, a jezgro prelazi u stadijum belog patuljka, koji se postepeno gasi dok ne postane zvezdani ugarak.

Dakle, kroz 5–6 milijardi godina Sunce će, postajući crveni džin, gutati jednu po jednu planetu. U toku jedne milijarde godina njegov prečnik će dosegnuti veličinu orbite Marsa; Zemlja će tada biti obuhvaćena vrelim gasovima, okeani će proključati, a kontinenti će se istopiti. Cela naša planeta će, tako, ispariti.

Ovo nas, razume se, mnogo ne zabrinjava. Za ljudske predstave o vremenu i prolaznosti, Sunčeve trajanje je neizmerno dugo, gotovo večito. Zato Sunce možemo s pravom da smatramo neiscrpnim izvorom energije.

O Suncu, ipak, ne znamo sve, a možda ni dovoljno. Veliku dozu nesigurnosti je u naše poznavanje nuklearnih procesa na Suncu unela jedna sičušna čestica, neutrino, koja se u njima javlja. Ta čestica, budući neutralna i gotovo bez mase, lako napušta Sunčeve jezgro i dospeva do Zemlje. Posmatrajući neutrine, stoga, možemo direktno da „zagledamo“ u Sunčeve jezgro. Već jednu i po deceniju američki fizičar Robert Dejvis traga za Sunčevim neutrinima u jednom dubokom rudniku zlata u Južnoj Dakoti. Ali, na veliko iznenađenje naučnog sveta, nalazi samo trećinu od onog broja neutrina koji bi Sunce moralo da proizvede ako su naše teorije o njegovom funkcionisanju tačne. Ovaj problem je poznat kao „zagonetka nedostajućih neutrina“.

Do sada niko nije dao ubedljivo objašnjenje Dejvisovog negativnog rezultata. To ne može da nas ne zabrine. Jer dokle god nismo sigurni u to da je sve u redu s

nebeskim telom od kojeg zavisi naš opstanak, ne možemo biti spokojni. Nadajmo se da otkriće pravog objašnjenja neće promeniti naše glavne predstave o Suncu.

Energija koja se oslobođi u Sunčevom jezgru nije ona koju direktno primamo. Potrebno je više miliona godina da se toplotno zračenje probije iz Sunčevog jezgra do njegove površine. Sunčeva struktura je veoma složena i nedovoljno izučena, te ne znamo tačno kako ovaj prenos energije teče. Ali, zbog visokih temperatura, taj proces je zcelo veoma buran, naročito blizu površine, gde se pojavljuju izuzetno jaka strujanja konvekcione prirode.

Golim okom vidimo samo spoljašnje slojeve Sunca, koji se nazivaju solarnom atmosferom. Ona se sastoji iz tri oblasti — fotosfere, hromosfere i korone, koje imaju vrlo različite osobine.

Skoro sva svetlost koju primamo od Sunca dolazi iz fotosfere (otuda i njeno ime). Fotosfera je, dakle, ono što vidimo kad posmatramo Sunce pod normalnim okolnostima. A kada se u njega zagledamo pomoću instrumenata, vidimo niz veoma zanimljivih pojava.

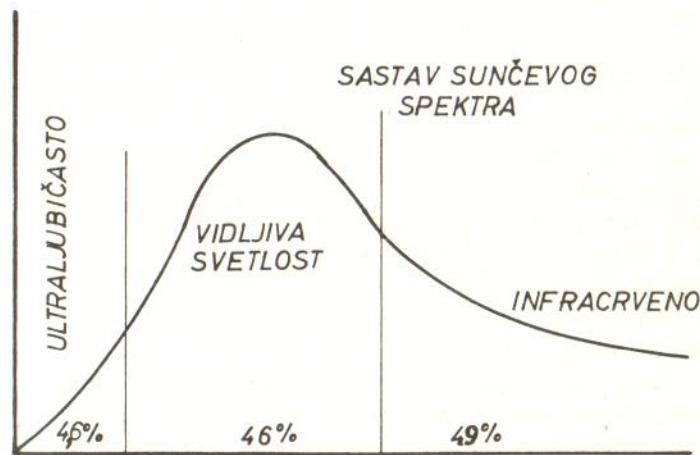
Prvi čovek koji je detaljno posmatrao fotosferu, Galileo Galilej, primetio je da se u njoj povremeno javljaju tamne pege. Galileju je to otkriće donelo nevolje, jer je od katoličke crkve bio optužen da huli na boga, koji, zcelo, nije mogao dozvoliti da se na savršenom nebeskom telu javljaju mrlje.

Kasnijim naučnicima je, međutim, proučavanje pega omogućilo da o Suncu saznaju mnoge detalje. Najpre je praćenjem kretanja pega otkriveno da se Sunce obrće oko svoje ose, zatim da se one javljaju u velikom broju u jedanaestogodišnjim ciklusima, da u oblastima pega magnetsko polje postaje vrlo jako, i dr. U vezi s pegama javljaju se i prominence — ogromni mlazevi gasa koji se izbacuju do visine od blizu milion kilometara iznad Sunčeve površine.

Sunčeve pege ne utiču primetno na ukupnu energiju koju ono odašilje, ali u periodima kada njihov broj dostiže maksimum, sa Sunca se emituju velike količine raznih čestica, koje dospevaju na Zemlju i dejstvuju na njenu

atmosferu. Neki naučnici veruju da pojавu pega prate i znatni poremećaji zemaljske klime. Na taj način, moglo bi se očekivati da postoji izvesna veza između pega i sunčanosti u pojedinim oblastima na Zemlji, pa bi, prema tome, praćenje pega moglo da ima značaja za korišćenje sunčane energije. Ali to su još nepotvrđene pretpostavke. Jedna pojava, ipak, izgleda dosta pouzdano ustanovljena: u periodu najveće Sunčeve aktivnosti, tj. javljanja maksimalnog broja pega, grožđe je izuzetno dobrog kvaliteta i daje najbolje vino. Ljubitelji dobre kapljice će, prema tome, tražiti vino iz berbi 1948., 1959., 1970., 1981. itd.

Temperatura na površini Sunca nije svuda ista, ali se iz oblika njegovog spektra može usvojiti srednja temperatura od oko 5 800 K.



Sl. 1. Sastav Sunčevog spektra.

Najveći deo Sunčeve energije emituje se u prostor u obliku elektromagnetskih talasa, i to poglavito u vidljivoj i infracrvenoj oblasti, a manje u ultraljubičastoj (sl. 1). Nekoliko postotaka energije odnose se na Sunca neutrini, iks-zračenje i razne čestice koje čine tzv. solarni vetrar.

III SUNČEVO ZRAČENJE NA ZEMLJI

Svetlosti večna luča
izrodi sveta život.

Jovan Subotić

Фрлено е семејо на моејо сонце
бо ораниците на свејоји
И што се може сеја шука?

Pagoban Павловски

Zemlja, koja je od Sunca udaljena oko 150 miliona kilometara, prima samo neznatan deo njegove energije – tek pola milijarditog dela. No i ta energija je za naše pojmove neshvatljivo velika – ona odgovara snazi od 175 milijardi megavata. Ta snaga premaša preko 100 000 puta snagu svih elektrana na Zemlji kada rade u punom pogonu. Zahvaljujući njoj je nastao i održava se život na našoj planeti. Sav biljni i životinjski svet zavisi od Sunca; sunčana energija diže vodu u atmosferu i tako obnavlja vodu reka; ugalj i nafta predstavljaju hiljadugodišnji proizvod sunca; čak i snaga vetra, morskih talasa i okeanskih struja vodi poreklo od njega. Ono što Zemlja za nekoliko minuta primi od Sunca odgovara celokupnoj godišnjoj proizvodnji električne energije u svetu!

Snaga koja na ulasku u Zemljinu atmosferu dospeva na kvadratni metar površine upravne na pravac Sunčevih zraka naziva se *solarnom konstantom*. Prema najnovijim merenjima, njena vrednost iznosi 1353 W/m^2 .

Na površinu Zemlje dospeva snaga manja od ove, jer se jedan deo zračenja reflektuje od atmosfere i vraća u prostor, a drugi se apsorbuje u njoj. Vrednost prispele snage zavisi od ugla pod kojim Sunčevi zraci prolaze kroz atmosferu i od meteoroloških uslova. Što pravac Sunčevih zraka više odstupa od vertikale, to je njihov put kroz atmosferu duži, pa je i na Zemlju prispela snaga manja. Na

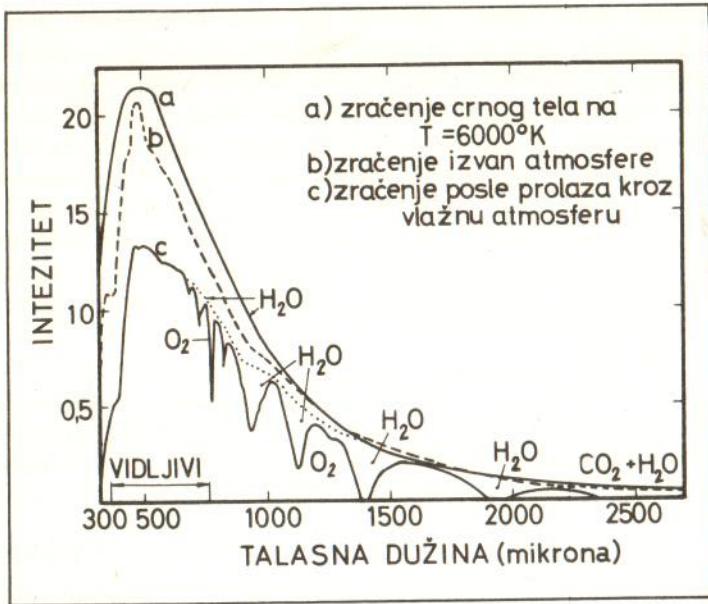
primer, pod uglom od 60° (ili 30° u odnosu prema horizontali), a to je položaj podnevног Sunca sredinom januara u Beogradu, dužina puta kroz atmosferu je dvaput veća nego pri vertikalnom ulasku zraka. Ipak, Sunčeva snaga je tada, po potpuno vedrom danu, umanjena za samo oko 10 posto. Ovome treba dodati činjenicu da je Sunce, za severnu poluloptu, zimi bliže Zemlji nego leti za oko 3 odsto, pa je njegova snaga, zbog zavisnosti od kvadrata rastojanja, zimi veća za oko 6 odsto. *Zimsko sunce, dakle, sija gotovo istom snagom kao letnje, samo je njegova putanja preko neba znatno kraća.*

Da bi se apsorpcija u atmosferi tačno definisala, uvođe se dva parametra – optička vazdušna masa, M , i sadržaj vodene pare. Optička vazdušna masa se određuje dužinom puta radijacije kroz atmosferu, pri čemu se vertikalna putanja uzima za jedinicu mase. Izraženo formulom:

$$M = \frac{1}{\cos \alpha},$$
 gde je α ugao između vertikale i pravca prema Suncu. Izvan atmosfere, razume se, imamo vazdušnu masu nula (na engleskom *air mass 0*, skraćeno AM0); za vertikalni pravac ($\cos 0^\circ = 1$) imamo AM1, za $\alpha = 60^\circ$ AM 2, itd. Za AM1, a pri malom sadržaju vodene pare, dima i prašine u atmosferi, na površinu Zemlje leti dospeva snaga od 970 W/m^2 , a zimi od 1030 W/m^2 . U opštim procenama se, međutim, obično uzima zaokružena srednja vrednost od 1 kW/m^2 .

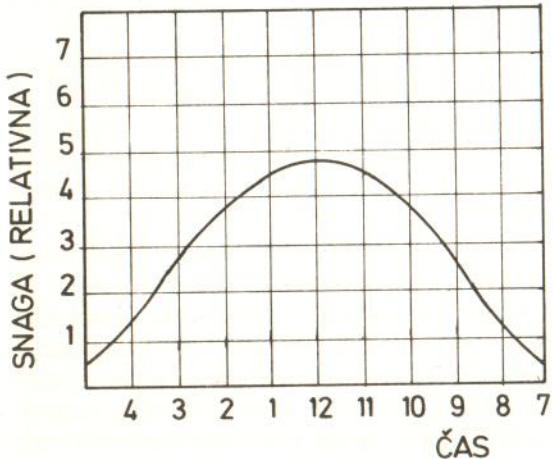
Spektar Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu Zemlje razlikuje se od onog izvan atmosfere (sl. 2). Apsorpcija zraka pojedinih talasnih dužina u atmosferi nije ravnomerna, usled čega se pojavljuju tzv. apsorpacione linije, koje odgovaraju apsorpciji u pojedinim molekulima (O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 i dr.).

S gledišta praktičnog korišćenja sunčane energije interesuje nas njena ukupna količina koja dospeva na jedinicu površine u toku dana. Ta količina zavisi od geografske širine, godišnjeg doba, orijentacije površine i meteoroloških prilika. Postoje metodi njenog izračunavanja za razne uslove, ali oni su pouzdani samo ako se razmatra geometrijski faktor, tj. zavisnost energije od položaja Sunca prema



Sl. 2. Sunčev spektar izvan atmosfere i na površini Zemlje.

posmatranoj površini. Drugim rečima, možemo da izračunamo koliko energije dospeva na bilo koju lokaciju i u bilo koji čas po potpuno vedrom danu. Na sl. 3 data je, za



Sl. 3. Zavisnost Sunčeve snage od doba dana (za horizontalnu ravan).

horizontalnu ravan, zavisnost Sunčeve snage od njegovog ugla prema horizontali, odnosno od doba dana. Stvarna energija je, pak, veoma zavisna od meteoroloških uslova, pa se pouzdani podaci mogu dobiti jedino merenjem.

Sunčev zračenje se meri pomoću solarimetara – instrumenata posebno konstruisanih za tu svrhu. Najčešće se upotrebljava piranometar, u kome se energija Sunčevog zračenja apsorbuje na horizontalnoj crnoj površini, usled čega se ova zagreva. Porast temperature se meri pomoću termopara, pa se, na osnovu kalibrirane skale, iz napona koji daje termopar izvodi podatak o Sunčevoj snazi ili energiji.

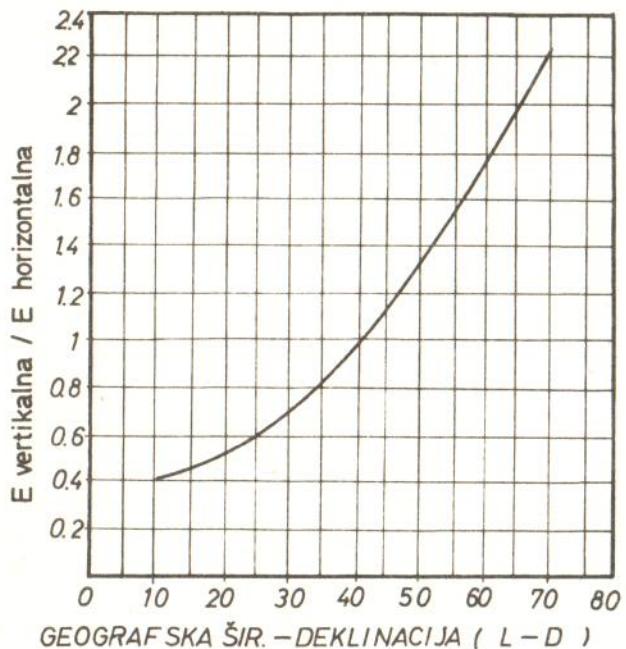
U novije vreme sve češće se zračenje meri pomoću kalibrisanih solarnih fotonaponskih ćelija (videti glavu IX). Ove ćelije su jeftine, pouzdane i daju jak električni signal, koji se lako registruje.

Treba naglasiti da na površinu Zemlje dospevaju dve komponente Sunčevog zračenja: jedna dolazi neposredno od Sunca (direktno zračenje) a druga nastaje rasejavanjem direktnog zračenja u atmosferi (rasejano ili difuzno zračenje). I po najvedrijem danu, s minimalnim sadržajem vodene pare, a uz nezagađenu atmosferu, oko 8 posto ukupne energije potiče od rasejanog zračenja. U blizini gradova ideo rasejanog zračenja se penje i do 22 posto. Po oblačnom danu je, razume se, sve zračenje difuznog porekla. Ukupno zračenje, direktno i rasejano, naziva se i globalnim zračenjem. U piranometru se obično meri ukupno zračenje, jer njegova prijemna površina ima polusferno vidno polje (od 2π steradijana). Međutim, pomoću posebnog zastora na paranometru može se meriti samo direktno ili, pak, samo difuzno zračenje.

Ponekad je važno imati posebne podatke za direktno zračenje, jer neki uređaji, npr. s optičkim koncentratorima, koriste samo tu komponentu.

U meteorološkim stanicama obično se meri Sunčev zračenje koje pada na horizontalnu površinu, ređe na vertikalnu. U praksi se, međutim, solarni uređaji često postavljaju pod nekim nagibom prema horizontalnoj ravni, pa je potrebno preračunati energiju za odgovarajući ugao

nagiba. To je dosta složen račun, koji zahteva specijalizovano znanje. Ovde ćemo dati dva dijagrama pomoću kojih se, polazeći od podataka za horizontalnu ravan, može odrediti, s dovoljnom tačnošću za najveći broj primena, vrednost energije za nagibe površina od 90° , 75° , 60° i 45° , a za orientaciju prema jugu (sl. 4 i 5).

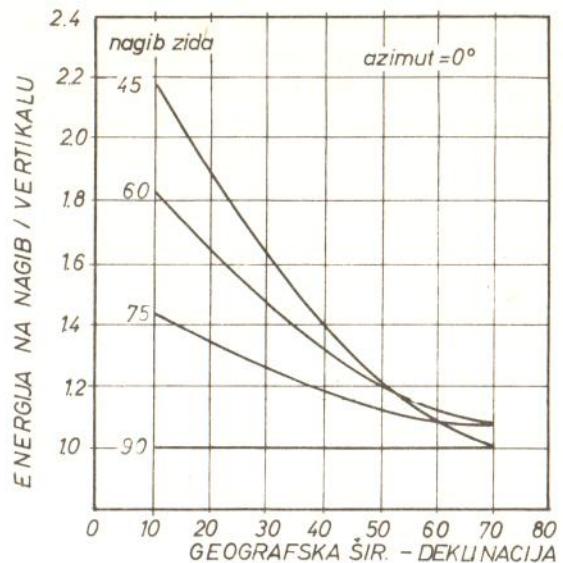


Sl. 4. Odnos energije koja dospeva na vertikalnu ravan prema energiji koja dospeva na horizontalnu ravan u zavisnosti od ($L - D$).

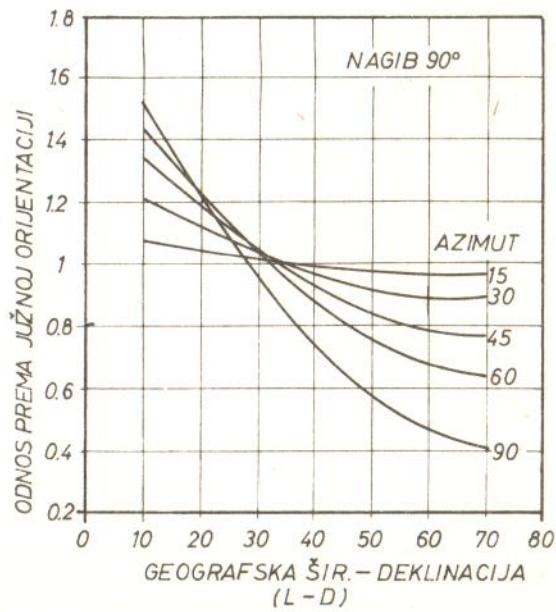
Da bismo koristili ove dijagrame, moramo najpre da za posmatranu lokaciju, geografske širine L , za svaki mesec izračunamo vrednost parametra $L - D$, gde je D Sunčeva deklinacija sredinom meseca. Na tabeli 3 dati su osnovni

Tabela 3. Vrednosti solarne deklinacije sredinom meseca (stepeni)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-21,4	-14,0	-2,8	9,1	18,6	23,1	21,4	14,0	2,8	-9,1	-18,6	-23,1



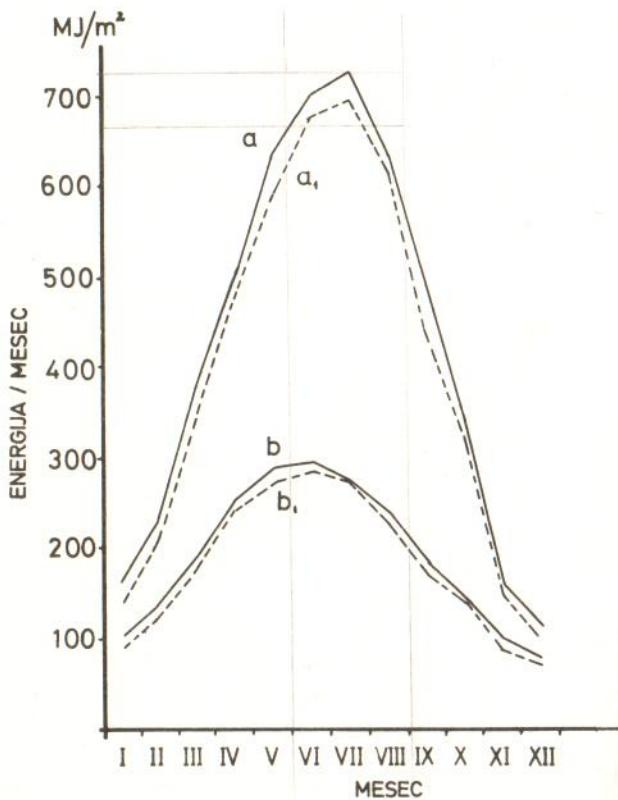
Sl. 5a. Odnos energije koja dospeva na razne nagibe prema energiji koja dospeva na vertikalnu ravan u zavisnosti od ($L - D$).



Sl. 5b.
Uticaj ugla zakretanja (azimuta) vertikalne ravni na količinu dospele energije u zavisnosti od ($L - D$).

podaci za izračunavanje vrednosti D. Parametar L – D je, očigledno, ugao podnevnog Sunca sredinom meseca.

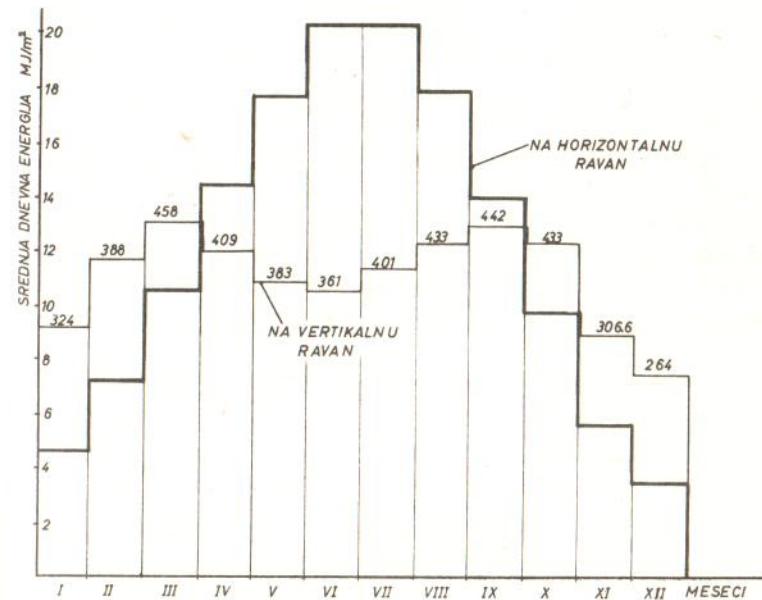
Zatim po dijagramu na sl. 4 odredimo odnos energije koja u toku meseca pada na vertikalnu ravan prema energiji (merenoj) koja pada na horizontalnu ravan. Za određivanje količine energije koja dospeva na druge nagibe koristimo dijagram na sl. 5a, koji daje odnos prema energiji prispeloj na vertikalnu ravan. Ako nas interesuje energija koja pada na vertikalnu ravan, ali pod drugim azimutom (orientacijom prema jugu), služimo se dijagramom na sl. 5b.



Sl. 6. Raspodela sunčane energije po mesecima za horizontalnu ravan u Beogradu (a i a₁ – ukupna energija, b i b₁ – energija difuznog zračenja; a₁ i b₁ – meteorološka opservatorija; a i b – Zeleno brdo).

Za površine pod nagibom značajno je i zračenje koje se reflektuje od okoline (tzv. albedo). To zračenje je uglavnom difuzno i pada na prijemnu površinu pod raznim uglovima. Intenzitet reflektovanog zračenja zavisi od toga o kakvoj se okolini radi. Za zelene površine koeficijent refleksije iznosi oko 0,2–0,3, tj. oko 20–30 posto Sunčevog zračenja se reflektuje s okolnog tla. Kada je, pak, okolina pokrivena snegom, reflektovano zračenje može da poveća i do 70 posto ukupnu energiju koja pada na nagnutu površinu. Sasvim je, prema tome, u pravu pesničinja Anica Savić-Rebac kada kaže: „Toplotra nežna zrači sa osunčana snega“.

Na sl. 6 prikazan je godišnji hod ukupnog i difuznog zračenja za Beograd, merenog za horizontalnu ravan. Vidimo da u Beogradu na horizontalnu površinu dospeva oko 4,3 puta manje energije u januaru nego u julu. To



Sl. 7a. Srednja dnevna energija Sunčevog zračenja za horizontalnu i vertikalnu ravan u Beogradu. (Brojke uz dijagram za vertikalnu ravan označavaju ukupnu mesečnu energiju u MJ/m².)

pokazuje da su za neke primene, npr. za grejanje zgrada, naše potrebe veoma neusklađene s onim što nam Sunce daje, i ovo je jedan od najvećih problema u grejanju zgrada sunčanom energijom. Međutim, ako posmatramo energiju koja u januaru dospeva na strmiju površinu, recimo na vertikalnu, taj odnos (prema energiji koja dospeva na horizontalnu ravan u julu) znatno je povoljniji i iznosi 2,3 (sl. 7a).

Za korisnike sunčane energije važni su podaci i o srednjoj dnevnoj sumi energije po mesecima, kao i o prosečnim temperaturama za odgovarajuće periode. Ti podaci za Beograd dati su na tabelama 4 i 5. Takođe je neophodno, kao što smo istakli, imati podatke o količini energije koja dospeva na nagnutu površinu. Na sl. 7b izračunati su podaci za Beograd za razne nagibe u letnjem i zimskom periodu. Vidimo da za zimski period optimalni ugao iznosi 60° , ali nema bitne razlike ni ako se od ovog ugla odstupi nadole i za 20° , a nagore i za 30° (tj. možemo prijemnu površinu da postavimo pod bilo kojim uglom između 40° i 90°). Ovo se objašnjava velikim doprinosom difuznog zračenja i albeda u tom periodu.

Ako smo zainteresovani za korišćenje sunčane energije tokom cele godine, a to je slučaj pri zagrevanju vode za svakodnevnu upotrebu, onda optimalni ugao iznosi 45° . Uopšte uvez, optimalni ugao za celu godinu približno je jednak geografskoj širini, a za zimski period tom uglu dodajemo $10 - 15^\circ$.

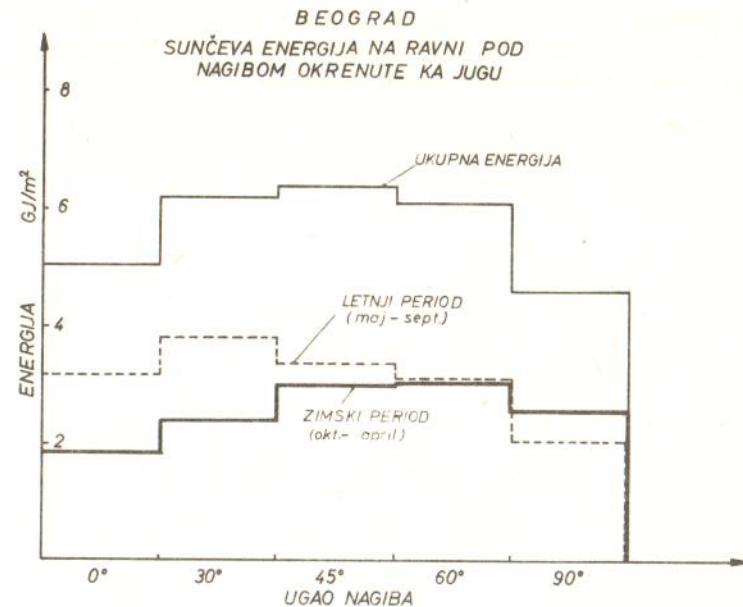
Tabela 4. Srednje dnevne sume sunčane energije u Beogradu (kJ/m^2)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
a) 5 158	8 242	12 008	16 527	20 125	23 054	23 054	20 418	15 983	11 129	5 397	3 766
b) 3 180	4 853	6 109	8 368	9 247	9 834	8 870	7 698	6 108	4 644	3 263	2 761

a) ukupno zračenje; b) difuzno zračenje

Tabela 5. Srednje mesečne temperature u Beogradu ($^\circ\text{C}$)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-0,5	1,3	6,4	11,9	16,7	20,0	22,1	21,6	17,8	12,5	6,7	2,0



Sl. 7b. Zavisnost primljene sunčane energije od ugla nagiba prema horizontali.

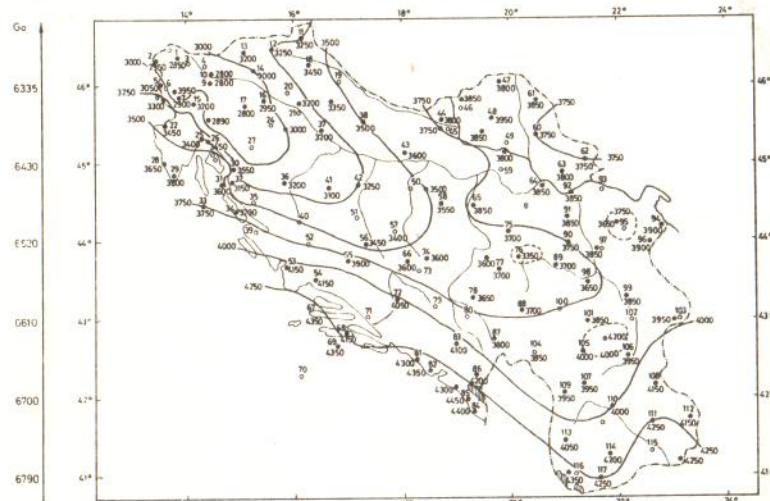
Kod većine solarnih uređaja samo difuzno zračenje nije dovoljno da u zimskom periodu dovede do upotrebljivog porasta temperature. Stoga je za realnu ocenu učinka uređaja, npr. prijemnika, potrebno znati i prosečan broj sunčanih časova. Taj podatak dat je za Beograd na tabeli 6.

Tabela 6. Trajanje osunčavanja u Beogradu (časova)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
85	106	154	186	226	270	301	291	231	193	89	59

Meteorološki podaci za sunčanost i količinu sunčane energije na području Jugoslavije veoma su oskudni i tek predstoji zadatak da se prikupe za dovoljan broj mernih mesta. Iz iskustva se zna da lokalne veličine znatno variraju, čak i na rastojanju od nekoliko kilometara, te dosadašnja merenja za Jugoslaviju, izvođena u 18 stanica,

ni izdaleka nisu dovoljna. Čak ni mereni podaci nisu obrađeni tako da mogu da posluže za solarne proračune, a nisu ni lako dostupni javnosti. Za sada se, na žalost, svaki projektant solarnih uređaja snalazi kako zna i ume, a isti posao nezavisno obavlja više ljudi, umesto da se podaci kompetentno obrade i publikuju kako bi svakome bili na



Sl. 8. Srednje dnevne sume ukupnog zračenja koje pada na horizontalnu ravan u raznim mestima Jugoslavije. Na ordinati označenoj Go date su prosečne sume vanatmosferskog globalnog zračenja u Wh/m^2 .

raspolaganju. Na sl. 8 dati su podaci o srednjim dnevnim sumama ukupnog Sunčevog zračenja za neka mesta u Jugoslaviji.

IV PRIJEMNICI SUNČANE ENERGIJE

*Rominja s vedra neba ko kiša od iskara
Sunčana sveta krv*

Vladimir Nazor

Sunčana energija koja dospeva na Zemlju predstavlja, kao što smo videli, elektromagnetno zračenje koje, pored vidljivog dela spektra, sadrži i ultraljubičaste i infracrvene zrake. Ono se može pretvoriti u druge forme energije – toplotnu, hemijsku, mehaničku, električnu itd. Savremenom društву neophodna je energija u svim tim vidovima, pa se u laboratorijama širom sveta ulažu veliki napor da se korišćenjem sunčane energije energetske potrebe što potpuno podmire. Front iskorišćavanja sunčane energije je, tako, veoma širok. Za sada je najuspešnije njeno pretvaranje u toplotu. Pri tome se mogu postići temperature i do $3\,500^\circ\text{C}$. Međutim, najveću primenu našli su uređaji koji rade na temperaturama ispod 100°C . Ta niskotemperaturna toplota se, u stvari, najčešće traži i koristi, i to kako u svakodnevnom životu, tako i u mnogim industrijskim procesima. U toj primeni moguće je postići visok stepen iskorišćenosti sunčane energije, čak do 80 posto.

Pretvaranje sunčanog zračenja u toplotu je jednostavan fizički proces: zračenje se direktno apsorbuje u raznim materijalima, pri čemu se apsorbovana energija najvećim delom pretvara u kinetičku energiju elektrona i vibracionu energiju atoma materijala od koga je načinjen apsorber. A to se manifestuje kao njegovo zagrevanje. Uređaj u kome se ovaj proces odigrava naziva se prijemnik ili kolektor sunčane energije.

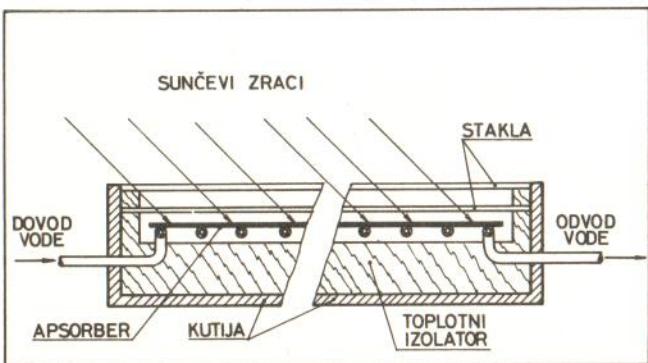
Prema konstrukciji i načinu rada razlikujemo dve osnovne vrste prijemnika – ravne i fokusirajuće. Obe imaju više desetina idejnih i konstruktivnih rešenja. Ovdje ćemo opisati ona koja su do sada našla šиру praktičnu primenu ili koja imaju znatnije potencijalne prednosti.

RAVNI PRIJEMNICI

*Videću opet one Lestvice Sunčane,
Po kojima se sva sunca dižu i spuštaju.*

Rastko Petrović

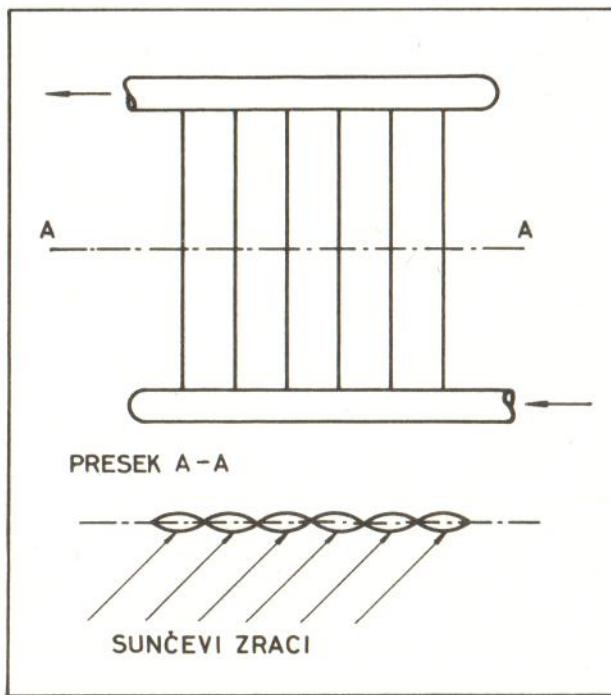
Ravni prijemnici imaju dve velike prednosti nad onima s koncentratorima svetlosti. Prvo, ne moraju se stalno okretati prema Suncu; i, drugo, prikupljaju ne samo direktno Sunčevu zračenje nego i difuzno zračenje iz svih pravaca. Zato se za dobijanje tople vode i zagrevanje zgrada gotovo isključivo koriste oni.



Sl. 9. Poprečni presek vodenog prijemnika.

Glavni delovi ovog tipa prijemnika prikazani su šematski na sl. 9. Ovdje ćemo razmotriti osnovna svojstva i funkcije pojedinih njegovih delova.

Apsorber prijemnika. Kod ravnih prijemnika Sunčevu zračenje se apsorbuje na ravnoj ploči. To je crno telo koje upija najveći deo sunca, više od 95 odsto. Apsorber je u isto vreme razmenjivač toplote, jer primljenu energiju predaje u obliku topline radnom fluidu, koji je odvodi do potrošača ili u toplotno skladište, radi kasnije upotrebe. Kao radni fluid upotrebljava se tečnost, najčešće voda, čista ili



Sl. 10. Apsorber vodenog prijemnika.

pomešana sa sredstvom protiv zamrzavanja (antifrizom), ili vazduh. U vezi s ovim, razlikujemo vodene i vazdušne prijemnike. Pojedini tipovi prijemnika razlikuju se najviše po konstrukciji apsorbera. Prikazaćemo najuspešnija rešenja.

Apsorberi se prave od bakra, mesinga, gvožđa, aluminija, nekih plastika, a i od raznih kombinacija ovih

materijala. Apsorber treba da ima dobru topotnu provodnost i da je u dobrom kontaktu s fluidom kako bi na ovaj efikasno preneo primljenu topotu. Takođe mora da bude otporan na koroziju i mehaničko naprezanje, vremenski postojan, pogodan za automatizovanu proizvodnju i relativno jeftin. Na žalost, ni u jednom od tipova koji se sada prodaju u svetu nisu u potpunosti zadovoljeni svi ovi zahtevi i još se traga za najboljim rešenjem. Ipak, ima više apsorbera koji u praksi daju zadovoljavajuće rezultate.

Konstruktivno najteži zadatak pri gradnji vodenih apsorbera predstavlja rešenje prenošenja apsorbovane topote s prijemne ploče na fluid. Idealno rešenje prikazano je na sl. 10. Apsorber je tu načinjen od tankih bakarnih limova tako profilisanih da se posle njihovog spajanja dobija neprekidan niz pljosnatih otvora u obliku cevčica. Ovde se prenos topote odvija najkraćim putem, upravno na prijemnu ploču.

Tada je dovoljna samo mala temperaturna razlika između površine apsorbera i fluida da bi se preneo najveći deo apsorbovane energije. Stoga ovaj prijemnik radi na temperaturi tek nešto višoj od temperature fluida, što je, kao što ćemo videti, jedan od najvažnijih uslova za postizanje dobrog stepena korisnosti.

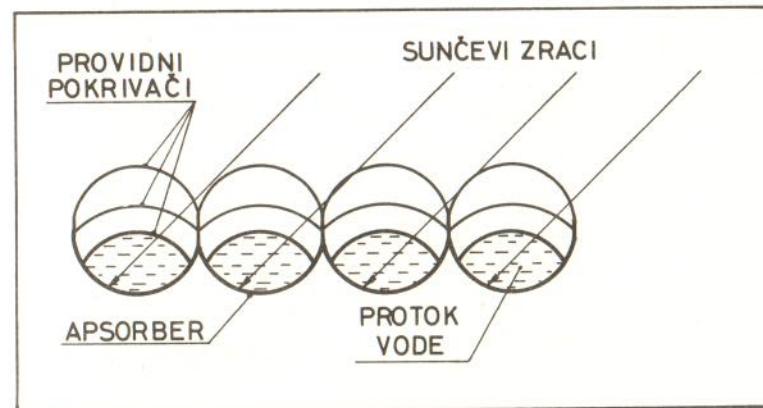
Jedan od tehnoloških postupaka za proizvodnju apsorbera sličnog ovom jeste tzv. tehnika *roll-bond*. Tek izvaljane dve ploče od bakra ili aluminijuma se, još dok su na visokoj temperaturi, pod pritiskom stapanju, s tim što je prethodno, pomoću grafitnog premaza, na njima označen plan vodenih staza. Uduvavanjem vazduha pod pritiskom između njih one se razdvajaju tamo gde se nalazi grafitni sloj, čime se dobija neophodan profil za protok vode. Ovaj postupak je, međutim, relativno skup jer zahteva veliko početno ulaganje u opremu. Sem toga, u praksi se ne postiže dovoljna gustina propusnih otvora.

Sličan tip apsorbera proizvodi se, takođe, od tankog čeličnog lima elektrootpornim zavarivanjem, postupkom razrađenim u proizvodnji grejnih tela (radijatora). Na čeličnim limovima se najpre uobliče kanali, raspoređeni na sličan način kao pri postupku *roll-bond*, pa se onda limovi

spajaju elektrootpornim zavarivanjem. Unutrašnji spojevi između kanala ne moraju da budu kontinuirani, već je dovoljno tačkasto zavarivanje, dok je, razume se, neophodno postići potpunu zaptivenost po obimu apsorbera. Ovakvi čelični apsorberi su jeftini, dosta su trajni i izdržljivi na pritisak, ali mane su im relativno velika masa i slaba topotna provodnost, uslovljena karakteristikama čelika. Takođe se pojavljuje problem korozije pri dugotrajnoj upotrebi.

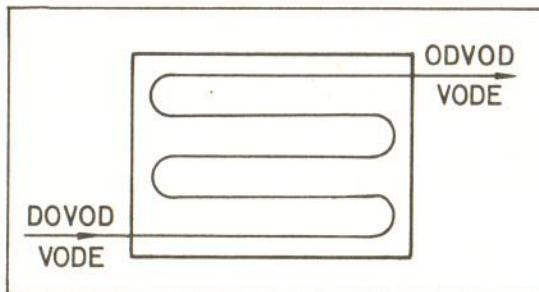
Posebno su zanimljivi prijemnici ovog tipa načinjeni od crnih plastičnih materijala, koji se lako oblikuju. Više takvih apsorbera izbačeno je na tržiste, ali njihove ozbiljne mane su u tome što su osetljivi na topotu, pa se po pravilu ne smeju pokrivati, i što imaju veoma slabu topotnu provodnost.

Stoga se oni uglavnom primenjuju za dobijanje topote niskih temperatura (do 50°C): na primer za grejanje vode u plivačkim bazenima, u kom slučaju prijemnik i nema drugih delova osim apsorbera. U poslednje vreme, međutim, razvijeni su plastični otporni na više temperature, kao i na ultraljubičasto zračenje, koji mogu da budu i providni. Tako je nedavno u SAD pušten u prodaju plastični prijemnik iz jednog dela, čiji crni plastični apsorber ima dva providna plastična pokrivača (sl. 11).



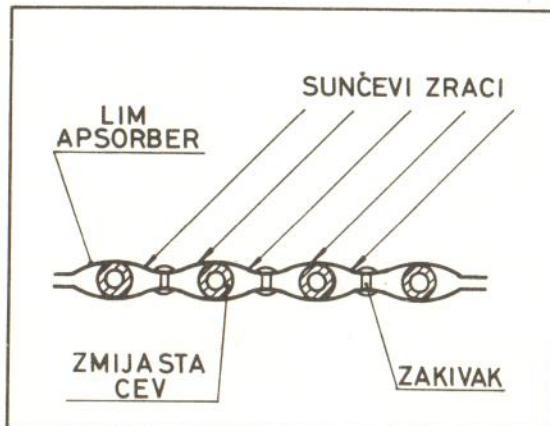
Sl. 11. Poprečni presek jednog tipa plastičnog prijemnika.

Druga često korišćena rešenja za apsorbere prikazana su na sl. 12 i sl. 13. Bakarna cev se savije u obliku zmije i zavari za bakarnu ploču (sl. 12). Zavarivanje, koje je skup proces, može da se izbegne tako što se zmijasta bakarna ili



Sl. 12. Šema zmijastog apsorbera.

aluminijumska cev zakivcima čvrsto stegne između dva aluminijumska, bakarna ili čelična lima, koji se prethodno mogu profilisati radi boljeg kontakta (sl. 13). Ali kod ovakvih konstrukcija sastav između cevi i lima ne provodi toplotu kako valja, a i ukupna masa korišćenog materijala je znatna. Ovo su, uglavnom, zastarela tehnička rešenja,

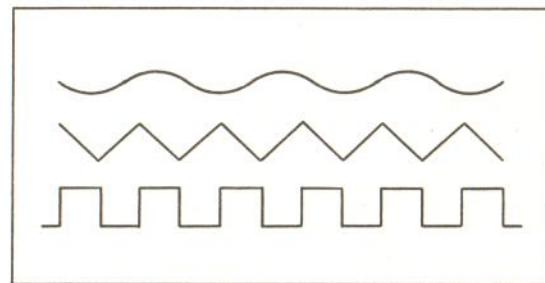


Sl. 13. Poprečni presek apsorbera sa zasebnom zmijastom cevi.

kojima se danas pribegava u samogradnji ili u zanatskoj proizvodnji prijemnika.

Apsorber vazdušnog prijemnika. Za razliku od apsorbera kod vodenih prijemnika, apsorber vazdušnih prijemnika ne predstavlja teži problem. To može da bude ravna ili razuđena i profilisana površina od bilo kog materijala otpornog na temperature do 160°C (do te temperature apsorber se može zagrejati kad se izloži Suncu ako se pri tome ne odvodi toplota). Obično se upotrebljavaju tanki rebrasti aluminijumski limovi raznih profila (sl. 14).

Jedno veoma jednostavno rešenje, a dobro u funkcionalnom pogledu, razrađeno je na Univerzitetu u Meksiku. To je apsorber od metalnih otpadaka (tzv. špon), koji se dobijaju pri obradi metala (sl. 15). Zračenje se u ovom slučaju apsorbuje po dubini, što omogućuje da se ostvari velika dodirna površina zagrejanog apsorbera s vazduhom.

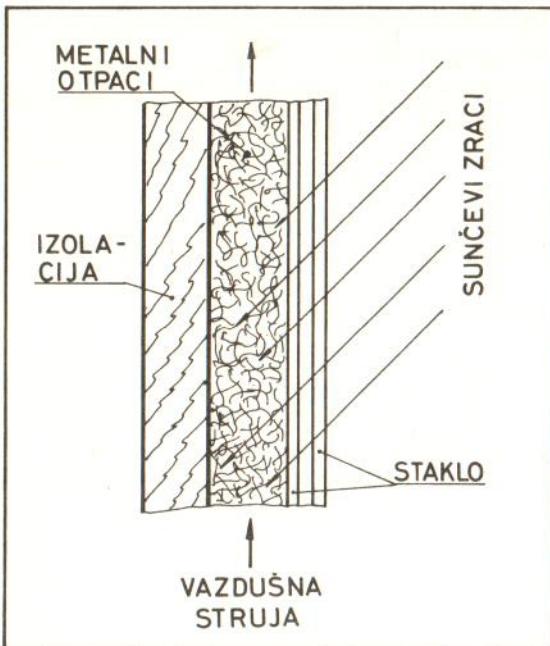


Sl. 14. Profili apsorbera vazdušnih prijemnika.

U isto vreme se spričava konvekcija vazduha prema pokrivaču, pa se tako smanjuju toplotni gubici.

Na sličnoj ideji zasniva se vazdušni apsorber od više slojeva gaze kroz koje struji vazduh.

Površina apsorbera. Kao što smo ranije naveli, apsorber treba da predstavlja crno telo koje upija najveći deo zračenja Sunčevog spektra. Zato se njegova prednja površina pokriva crnom bojom koja ima visok koeficijent apsorpcije (α) Sunčevog zračenja (iznad 0,90), i to pod



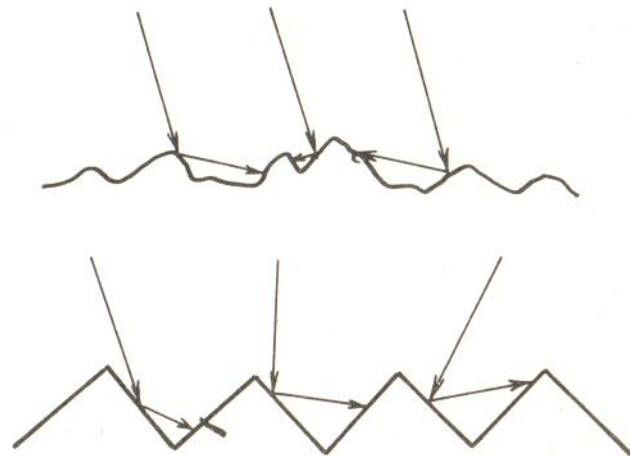
Sl. 15. Apsorber vazdušnog prijemnika s metalnim otpacima.

raznim upadnim uglovima. Sem toga, ova boja treba da ima višegodišnju postojanost i otpornost na temperature do 200°C. Na tabeli 7 dati su podaci za neke najčešće korištene boje.

Tabela 7. Koeficijent apsorpcije i emisije

Vrsta boje	Koeficijent apsorpcije	Koeficijent emisije
grafit	0,85	0,60
mat crna boja (<i>lamp black</i>)	0,97	0,97
crna boja za grejna tela (<i>piroxal</i>)	0,95	0,95
specijalna crna boja za prijemnike (<i>nextel</i>)	0,96	0,96
selektivna boja (crni hrom)	0,90	0,10

Poželjno je da površina bude hrapava, jer tada zraci imaju više izgleda da se apsorbuju (sl. 16, a i b). Prosečne dimenzijske neravnina treba da budu iznad nekoliko mikrona da ne bi došla do izražaja talasna svojstva svetlosti. Hrapavost površine može da se postigne bilo posebnom hemijskom ili mehaničkom obradom pre nanošenja boje, bilo dodavanjem boje nekog praha čija su zrna veličine od nekoliko mikrona (npr. talk, karborundum, pesak i dr.).



Sl. 16. Apsorpcija zračenja na hrapavoj površini.

Sem po apsorpcionoj moći, kvalitet površine apsorbera ceni se i po emisionoj sposobnosti. Prema zakonu zračenja, svako telo zagrejano na apsolutnu temperaturu T odaje po jedinici površine snagu P (energija u džulima po kvadratnom metru u sekundi) u vidu zračenja, saglasno relaciji

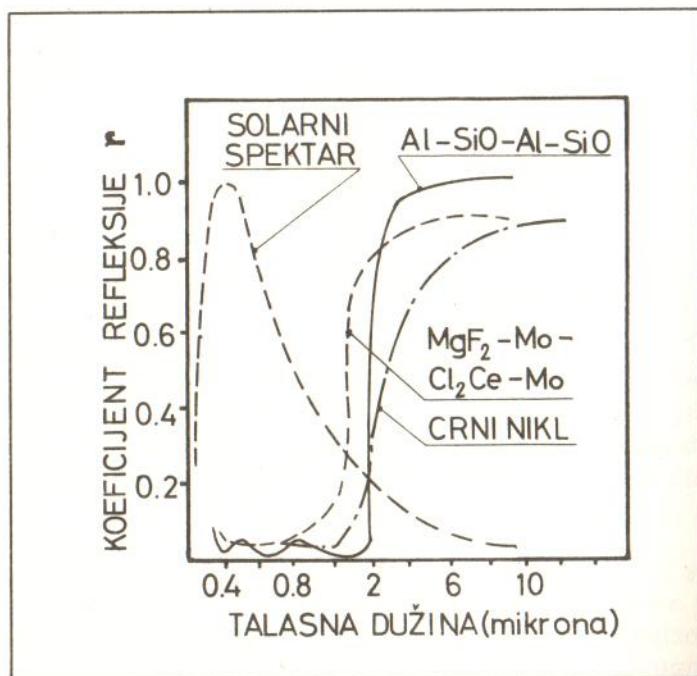
$$P = \epsilon \delta T^4$$

gde $\delta = 5,66 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$ označava konstantu koja ne zavisi od vrste tela, a ϵ izražava emisionu sposobnost površine (koeficijent emisije). Za apsolutno crno telo, tj. ono koje u potpunosti upija zračenje svih talasnih dužina, koeficijent emisije je jednak koeficijentu apsorpcije, tj. $\alpha = \epsilon = 1$. Drugim rečima, dobar apsorber je i dobar emiter. To je

nepovoljna okolnost, jer dovodi do gubljenja energije zračenjem, koje je utoliko veće ukoliko je apsorber sličniji absolutno crnom telu, a koje, uz to, raste s četvrtim stepenom temperature.

Absolutno crno telo predstavlja idealizaciju, jer su za realna tela koeficijenti emisije i apsorpcije uvek manji od jedinice. Može da se kaže da su realna tela pre siva nego crna. Ali ako se sivo telo definiše kao ono telo koje za sve talasne dužine zračenja ima isti koeficijent apsorpcije, odnosno emisije, onda u stvarnosti tела nisu ni siva, jer i α i ϵ zavise od talasne dužine, usled čega se njihov emisioni spektar razlikuje od spektra zračenja crnog tela.

Pošto se Sunčev spektar pretežno nalazi u vidljivom delu, s talasnim dužinama kraćim od jednog mikrometra, a



Sl. 17. Zavisnost koeficijenta refleksije od talasne dužine za razne selektivne površine.

prijemnici sunčane energije najčešće rade na temperaturama ispod 200°C (tj. ispod 573°K), to se spektar njihovog zračenja ne poklapa sa Sunčevim, već se nalazi u infracrvenom delu (talasne dužine iznad jednog mikrometra). Na toj okolnosti zasniva se ideja o površini koja ima selektivna svojstva u pogledu apsorpcije i emisije. Naime, pogodnim postupkom može da se obrazuje površina koja u oblasti Sunčevog spektra ima visok, a u infracrvenoj oblasti nizak stepen apsorpcije (sl. 17).

Takve selektivne površine sve više se upotrebljavaju u proizvodnji prijemnika visokog stepena iskorišćenosti. Postoji više njihovih vrsta. Neki materijali su po prirodi selektivni. U takve spadaju izvesni karbidi (npr. hafnijum karbid, HfC, oksidi kalaja, SnO₂, indijuma, In₂O₃, i dr.). Nijedan od poznatih materijala, međutim, nije sasvim zadovoljavajući u pogledu svih zahtevanih osobina, u koje spadaju dobra selektivnost, postojanost, niska cena izrade i drugo, te se već godinama ulažu veliki napor da se dođe do pogodnih selektivnih površina. Ti napor iđu u dva osnovna pravca u pogledu fizičkog principa delovanja. U jednom se selektivno svojstvo postiže tako što se na apsorber nanosi sloj koji je propustljiv za radijacije u vidljivom spektru, a za infracrvene ima veliki koeficijent refleksije zračenja. Tako se ne dozvoljava da topotni zraci iziđu iz apsorbera, jer selektivni sloj u infracrvenoj oblasti ima malu emisionu sposobnost (tzv. tandem-slojevi). Najčešće korišćeni slojevi ove vrste su crni hrom ili crni nikl, koji se na metalne površine nanose elektrolitičkim putem. Čelik oksidisan na visokoj temperaturi takođe spada u ovu grupu.

Drugi tip selektivnih površina koristi dobro poznati princip selektivne propustljivosti naizmenično poređanih dielektričnih slojeva različitih indeksa prelamanja svetlosti i polupropustljivih metalnih slojeva (tzv. interferencijski slojevi). Taj princip se odavno koristi u proizvodnju svetlosnih filtera za fotografске primene. Kao dielektrični slojevi najčešće se koriste neki oksidi (npr. SiO). Ove vrste površina su, međutim, neprihvatljivo skupe.

Topotna izolacija. Prijemnik se sa zadnje i s bočnih strana izoluje tako da topotni gubici budu za jedan red

veličine (tj. za oko deset puta) manji od gubitaka kroz prednju, providnu stranu, koje je mnogo teže izbeći. Izračunavanje toplotnog bilansa prijemnika pomoću kompjutera, koji simulira njegov rad pod raznim uslovima, pokazuje da je izolacija zadovoljavajuća ako prijemnik ima toplotnu provodnost manju od $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Na tabeli 8 dati su podaci o toplotnoj provodnosti za neke najčešće upotrebljavane materijale u konstrukciji prijemnika. Vidi se, na primer, da je poliuretanska izolacija debljine 5 – 8 cm zadovoljavajuća i za najteže radne uslove.

Poliuretan ima posebnu prednost u tome što se može direktno nalivati u kutije prijemnika, čime se postiže, pored želenog oblika izolacije, i zadovoljavajuća krutost kutija.

Tabela 8. *Toplotna provodnost nekih materijala*

Materijal	Toplotna provodnost (W cm/m ² K)
Poliuretan	1.87
Poliuretanska pena	2.45
Staklena vuna	3.46
Polistiren	3.60
Pluta	3.74
Mineralna vuna	5.19
Staklena vlakna	5.62
Drvo	
jela	24.21
hrast	34.59

Prednji pokrivač. Posle apsorbera, najvažniji deo prijemnika predstavlja prednji pokrivač, koji mora da propusti najveću količinu zračenja solarnog spektra i, u isto vreme, da spreči neposredan dodir atmosferskog vazduha s površinom apsorbera, kako bi se smanjili toplotni gubici konvektivne prirode. Poželjno je, takođe, da on spreči i gubitak energije toplotnim zračenjem s apsorbera. Uz ove osnovne zadatke, pokrivač treba da zaštitи prijemnik od atmosferskih padavina i od vlage, te prema tome mora da ima potrebnu mehaničku, toplotnu i hemijsku otpornost. Do sada još nije pronađen pokrivač koji bi u potpunosti

zadovoljio sve zahteve. Ipak, neki materijali pokazuju se prihvatljivim: u prvom redu staklo, a zatim neki specijalni plastični materijali, npr. staklena vlakna (fiberglas) pomešana s nekim vrstama polietilena (trgovački naziv „kalwal“), kao i plastici na bazi polivinilhlorida (trg. naziv „terval“) i dr.

Pri konstrukciji prijemnika treba odrediti broj pokrivača, njihove debljine, kao i potrebna rastojanja. Sve te veličine utiču na stepen korisnosti prijemnika, a predstavljaju i konstruktivan problem. Za njihovo određivanje potrebno je izvršiti detaljan termodinamički proračun elemenata prijemnika, a dosadašnja praksa naznačila je granice u kojima one treba da se kreću. Ovde ćemo ukratko razmotriti njihovu ulogu u funkcionisanju prijemnika.

Debljina pokrivača bira se uzimajući u obzir zahtevanu mehaničku otpornost na vетар i padavine (sneg, grad i dr.), a ova, opet, zavisi od dimenzija prijemnika. Na osnovu iskustva došlo se do pravila da spoljašnji pokrivač od stakla mora da ima debljinu bar 4 mm, dok se za unutrašnji može upotrebiti i staklo od 3 mm. Za plastične materijale obično proizvođač daje preporuke o neophodnoj debljini, zavisno od dimenzija prijemnika.

Broj pokrivača bira se prema uslovima pod kojima prijemnik treba da radi, pri čemu je glavni parametar temperaturna razlika između apsorbera i okoline. Veći broj pokrivača smanjuje konvektivne gubitke, ali, u isto vreme, smanjuje se i propustljivost za upadno zračenje a povećava težinu prijemnika. Razume se da on tada postaje skuplji. Zavisnost stepena korisnosti prijemnika od broja pokrivača može se videti na sl. 18.

Kad se ovaj dijagram prevede na praktični jezik, ispostavlja se, na primer, da prijemnik namenjen grejanju sanitarne vode u blažim klimatskim uslovima mnogo ne dobija prelaskom na dva pokrivača. Jer on radi tokom cele godine, a dobitak u energiji osetio bi se samo u zimskom periodu, kada je, ionako, zahvaćena Sunčeva energija osetno manja nego leti. U slučaju da se prijemnik koristi za grejanje otvorenog plivačkog bazena, gde je zahtevana