

se detaljno formulira operativni zadatak. Poslije uputa definira se i odobrava program. Na početku rada sabiru se sve potrebne informacije da se odrede parametarske podloge (selekcijom podataka iz literature i drugih izvora, intervjui, opservacije itd.), a ukoliko se radi o redizajnu, osobita se pažnja posvećuje analizi analognih proizvoda. Idejni prijedlozi prezentiraju se na različite vizuelne načine (prostoručni crteži, fotokolaži, modeli i kompjuterske simulacije). Uz to se prilaže izvještaj analize kao tekstualni dokaz i obrazloženje pojedinih prijedloga. Nakon izbora alternative (ili odbacivanja), pristupa se detaljnoj razradi idejnog rješenja. Rezultat se rada prezentira dizajnerskim izvedbenim nacrtima, modelom i simulacijom uporabe. Nakon toga pristupa se izvedbi prototipa. Uz prototipni model obavlja se završno interno verificiranje i eventualno fizičko testiranje. Prototip, pa i *nulta serija*, služe za testiranje tržišta na ograničenim lokacijama u određenim prilikama (npr. kao izložak na specijaliziranim sajmovima).

Istodobno uz dizajn proizvoda (odnosno grupe proizvoda) pristupa se i dizajnu instrumenata plasmana (od dizajna propagandnih sredstava kao što su prospekti, katalogi, filmovi itd., do dizajna izložbenih postava).

LIT.: Britanski industrijski dizajn (Katalog). Zagreb 1967. — Industrijsko oblikovanje u SR Njemačkoj (Katalog). Zagreb 1967. — *M. Meštrović i F. Križovac*, Odgoj i obrazovanje industrijskih dizajnera. Centar za industrijsko oblikovanje, Zagreb 1968. — *W. D. Cain*, Engineering product design. Business Books, London 1969. — Industrijsko oblikovanje i naša privreda. Zbornik savjetovanja, Sarajevo 1969. — *J. Doblin*, One hundred great product designs. Reinhold, New York 1970. — *M. Meštrović i F. Križovac*, Upravljanje industrijskim dizajnom i organizacija dizajn-biroa. Centar za industrijsko oblikovanje, Zagreb 1970. — *V. Papanek*, Dizajn za stvarni svijet. (Preveo G. Keller). Vidici, Split 1975.

F. Križovac

**INFRACRVENO ZRAČENJE**, elektromagnetsko zračenje valnih duljina  $\lambda \sim 0,8 \dots 1000 \mu\text{m}$ . S obzirom na položaj u spektru prema vidljivom zračenju, infracrveno zračenje može biti blisko, srednje i daleko. To razvrstavanje nije strogo, niti je jednoznačno usvojeno, a nastalo je prema načinu detektiranja.

W. Herschel je (oko 1800) istražujući spektar Sunčeva svjetla primijetio toplinske učinke izvan vidljivog dijela spektra, sa strane crvenog dijela. To je djelovanje pripisao djelovanju zračenja nevidljivog za oko, kojemu su priroda i svojstva jednaka svjetlosti, i nazvao ga infracrveno zračenje.

Infracrveno zračenje nastaje pri rotacijskim i vibracijskim prijelazima u atomima i molekulama (tabl. 1), dakle nastaje na svim temperaturama iznad apsolutne nule (v. *Fotokemija*, TE5, str. 597).

Tablica 1  
PODRUČJA INFRACRVENOG ZRAČENJA

Naziv	Valna duljina $\mu\text{m}$	Izvor
Blisko	0,8...2,5	Prijelazi između elektronskih stanja niskih energija
Srednje	2,5...50	Molekulske vibracije
Daleko	50...100	Molekulske rotacije

**Emitiranje i apsorpiranje infracrvenog zračenja** opisano je tzv. zakonima crnog tijela (v. *Atom*, TE1, str. 456). To su:

*Kirchhoffov zakon zračenja*, nazivan i drugim zakonom termodinamike za sustave koji zrače, iskazuje da tijela u termičkoj ravnoteži zrače onoliko energije koliko je i primaju.

*Planckov zakon zračenja* pokazuje kakva je spektralna raspodjela zračenja crnog tijela. Spektralna odzračnost (radijacijska egzistencija)  $M_\lambda$  (definirana kao gustoća toka zračenja po jedinici duljine vala) na valnoj duljini  $\lambda$  jest

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}, \quad (1)$$

gdje su konstante  $c_1 = 3,741832 \cdot (1 \pm 5,4 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$ ,

$c_2 = 1,438786 \cdot (1 \pm 3 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-2} \text{ K m}$ , a  $T$  temperatura crnog tijela. Upravo tim zakonom je M. Planck postavio hipotezu diskretnog prijenosa energije, tzv. hipotezu kvanta, koja je omogućila tumačenje pojava u mikrosvijetu (v. *Kvantna mehanika*).

*Stefan-Boltzmannov zakon* pokazuje da je ukupna energija koju zrači užareno tijelo proporcionalna četvrtoj potenciji temperature. Za crno tijelo ukupna odzračnost (gustoća toka zračenja) jest

$$M_u = \sigma T^4, \quad (2)$$

gdje je konstanta  $\sigma = 5,67032 \cdot (1 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-8} \text{ W K}^{-4} \text{ m}^{-2}$ .

*Wienov zakon pomaka* pokazuje da se porastom temperature maksimum u spektralnoj raspodjeli pomiče prema kraćim duljinama vala, tako da je umnožak valne duljine na kojoj je maksimalno zračenje  $\lambda_{\text{max}}$  i temperature  $T$  konstantan:

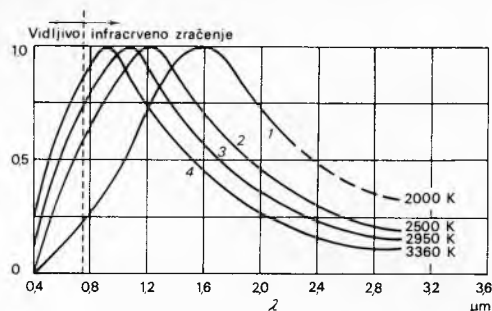
$$\lambda_{\text{max}} T = k, \quad (3)$$

gdje je konstanta  $k = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K m}$ .

Pri prostiranju infracrvenog zračenja vrijede svi zakoni geometrijske optike, uzimajući u obzir svojstva tvari za to zračenje (v. *Atom*, TE1, str. 456; *Fotometrija* TE5, str. 608; *Optika; Termodinamika*).

**Izvori infracrvenog zračenja.** Čvrsta tijela, osim na temperaturi apsolutne nule, zrače infracrveno zračenje i zrače sve do temperature  $\sim 3500 \text{ K}$  pretežno u tom području. To je većinom polikromatsko i nekoherentno zračenje. Bogati izvori takvog zračenja jesu sva užarena tijela.

*Infracrvene žarulje* su tehnički izvori polikromatskog i nekoherentnog zračenja. Glavni dio im je metalna nit ili tijelo nekog drugog oblika, žareno prolaženjem električne struje do temperature  $\sim 2500 \text{ K}$ . Te žarulje većinu energije zrače u bliskom i srednjem infracrvenom području ( $\lambda = 760 \dots 5000 \text{ nm}$ ), a manji dio ( $10 \dots 15\%$ ) u vidljivom. Na sl. 1 prikazana je spektralna raspodjela energije zračenja nekih tehničkih izvora.



Sl. 1. Spektralna raspodjela intenziteta nekih tehničkih izvora infracrvenog zračenja. 1 infracrvena grijalica, 2 infracrvena industrijska žarulja, 3 žarulja snage 500 W, 4 fotografski reflektor

*Laseri i poluvodički elementi* izvori su koherentnog i monokromatskog, odnosno linijskog zračenja, i to u bliskom infracrvenom području (v. *Laser*).

## DETEKTIRANJE INFRACRVENOG ZRAČENJA

Pri međudjelovanju infracrvenog zračenja i tvari predana energija zračenja očituje se obično u povišenju temperature tvari. To povišenje uzrokuje sekundarne pojave, promjenu mnogih svojstava tvari: obujma tijela, tlaka, indeksa loma, dielektričnosti, električne vodljivosti i kemijskih svojstava. Moguća je i pojava sekundarnog zračenja. Te se promjene događaju u različitim vremenima nakon početka ozračivanja, od nekoliko nanosekunda pa do nekoliko sati, mogu trajati samo za vrijeme ozračivanja, neko vrijeme nakon prestanka ozračivanja ili se mogu trajno zadržati. Detektori infracrvenog zračenja nazivaju se prema pojavama koje zračenje pobuđuje u tvari, koje se indiciraju ili mjere.

Za detektore infracrvenog zračenja navode se karakteristike kao i za detektore drugih vrsta zračenja: osjetljivost, spektralna

osjetljivost, detektivnost, responzivnost ili odgovor, moć razlučivanja i dr.

**Termički detektori infracrvenog zračenja** osnivaju se na indiciranju ili mjerenju fizikalnih svojstava tvari ovisnih o temperaturi. Osjetljivi su u cijelom području infracrvenog zračenja.

**Termometri** su spori i nepraktični detektori, ali se zbog točnosti koja se može s njima postići i podjednake osjetljivosti u cijelom području upotrebljavaju za baždarenje mjernih uređaja. **Termoelementi**, koji toplinsku energiju direktno pretvaraju u električnu, znatno su brži nego termometri.

Pri mjerenju mogu termometri biti u direktnom ili indirektnom kontaktu s mjerenim tijelom. Pri kontaktnom mjerenju povratno se utječe na stanje mjerenog tijela. Pri nekotaktnom mjerenju mjeri se infracrveno zračenje i posredno određuje temperatura mjerenog tijela.

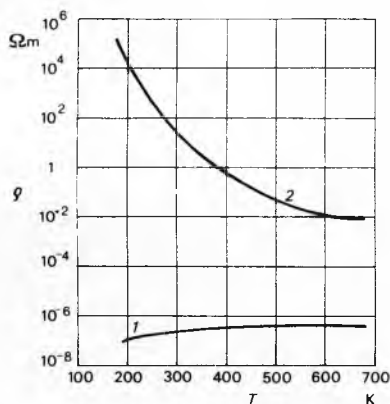
**Pneumatske ćelije** osnivaju se na promjeni obujma plina s promjenom temperature. Promjene obujma mjere se mehanički ili optički. Zbog mehaničke i termičke inercije brzina odgovora tih detektora je malena, pa su upotrebljivi samo za frekvencije niže od 100 Hz.

**Isparivači** su detektori u kojima infracrveno zračenje pada na tanak sloj ulja, koje se isparuje zbog zagrijavanja i tako njegov sloj djelomično stanjuje. Promjena debljine indicira se promjenom boje tankog sloja, obasjanog bijelim svjetlom, zbog interferencije (v. *Optika*).

**Bolometri** se osnivaju na mjerenju promjene neke električne veličine koja nastaje zbog promjene temperature električnog osjetljivog elementa. Bolometri su jednako osjetljivi na infracrveno zračenje svih valnih duljina; frekventno su neselektivni.

**Bolometar s metalom** sastoji se u biti od dviju tankih vrpce platine, koje su pocrnjene i blizu postavljene, jedna uz drugu. Spojene su kao dvije grane mosta za električno mjerenje, pa sve male promjene temperature okolice ne narušavaju ravnotežu mosta. Ako se samo jedna od tih vrpce izloži infracrvenom zračenju, promjena temperature te jedne vrpce, a time i električnog otpora, narušava ravnotežu mjernog mosta. Tako se mogu konstatirati promjene temperature od samo  $10^{-4}$  K.

**Termistor** je poluvodički otporni element s velikim negativnim koeficijentom promjene električnog otpora,  $\alpha = -4,4 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$  (sl. 2) (za usporedbu, bakar ima  $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ ). Osjetljivost termistora je također velika i njime se mogu konstatirati promjene temperature  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  K.



Sl. 2. Promjena otpornosti (specifičnog otpora)  $\rho$  s temperaturom 1 kovine (platina), 2 termistora (od slitine mangan-nikal-kobalt)

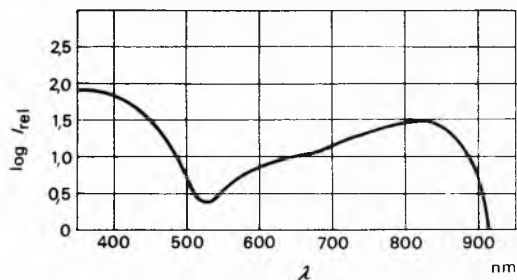
**Supravodički bolometri** osnivaju se na pojavi da se metalima pri prijelazu iz obične vodljivosti u supravodljivost, dakle pri vrlo niskim temperaturama, naglo mijenja otpor s promjenom temperature.

**Feroelektrični bolometri** osnivaju se na promjeni dielektričnosti feromagnetičkih tvari s promjenom temperature. **Piroelektrični detektori** nazivaju se kondenzatori koji kao dielektrik imaju neki feromagnetički materijal. Ozračeni infracrvenim zračenjem mijenjaju kapacitet, a ta se promjena može kao električna

informacija mjeriti na različite načine (v. *Električna mjerenja*, TE3, str. 641 i 661).

**Kemijski detektori** infracrvenog zračenja jesu fotoosjetljivi materijali, nanaseni obično na filmove ili ploče, kojima se osjetljivost proteže u blisko infracrveno područje.

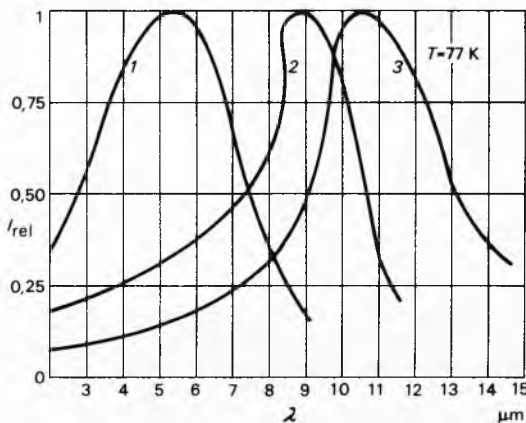
Fotoosjetljivi materijali imaju maksimum osjetljivosti u vidljivom području, to je tzv. vlastita osjetljivost. Ako su senzibilizirani i za infracrveno područje, tada imaju dva maksimuma osjetljivosti, jedan u vidljivom a drugi u infracrvenom području (sl. 3). Zato pri snimanju infracrvenim zračenjem treba filterima otkloniti ono zračenje u vidljivom području za koje postoji vlastita osjetljivost (v. *Fotografija*, TE5, str. 558).



Sl. 3. Spektralna osjetljivost Polaroid-filma za infracrveno zračenje

**Kvantni detektori infracrvenog zračenja.** Kvantni su detektori poluvodički elementi kojima električne karakteristike ovise o broju električnih naboja stvorenih razdvajanjem parova elektron-šupljina pod utjecajem upadnog zračenja. Upadni foton, ako ima dovoljnu energiju, prebacuje elektron iz valentne u vodljivu vrpce, a u valentnoj vrpce ostaje prazno mjesto — šupljina. Nakon nekog vremena elektron se vraća u valentnu vrpce, rekombinira sa šuplinom, a višak energije oslobađa u obliku fotona. Tako nastaje sekundarno, tzv. rekombinacijsko zračenje. Za vrijeme dok su par elektron—šupljina razdvojeni, oni se ponašaju kao slobodni nosioci elektriciteta. Pomoću njih element može voditi struju (fotovodljivi detektori), oni se mogu nakupljati na nekim elektrodama i tako uzrokovati razliku potencijala (fotonaponski detektori), ili se mogu gibati pod utjecajem vanjskog električnog polja (fotoelektromagnetski detektori).

Spektralna osjetljivost kvantnih detektora nije linearna (sl. 4), vrijeme odgovora je reda mikrosekunde i manje. Za svako spektralno područje postoji jedan ili više detektora koji imaju maksimum osjetljivosti u tom području.



Sl. 4. Spektralna osjetljivost kvantnog detektora (Hg—Cd—Te) za tri različita omjera Cd:Hg

**Fotodiode** su posebna grupa kvantnih detektora koji rade kao fotonaponski detektori. **Lavinske fotodiode** mogu se shvatiti kao detektori s ugrađenim fotomultiplikatorom. Elektroni, oslobođeni upadnim zračenjem, dalje se ubrzavaju jakim električnim poljem, te tako postižu energiju potrebnu za sekundarna razdvajanja parova elektron—šupljina.

Fotodetektor mora biti hlađeni na temperaturu blizu apsolutne nule da bi se smanjio termički šum. Zabranjeni energetski pojas mora biti dovoljno uzak da bi fotoni niskih energija mogli potaknuti prijelaze iz valentne u vodljivu vrpce. Vlastita toplinska energija detektora mora biti dovoljno niska da se izbjegne samozasićenje.

**Pretvorba infracrvenog u vidljivo zračenje.** Jedan od načina detektiranja infracrvenog zračenja jest pretvaranje infracrvenog zračenja u vidljivo. Najčešće se to postiže fluorescencijom (v. *Luminiscencija*). Dva su bitno različita načina pretvaranja infracrvene slike u vidljivu sliku, a infracrveni vidikon pretvara infracrvenu sliku u električni video-signal, koji se, analogno kao pri običnom televizijskom prijenosu, na katodnoj cijevi pretvara u vidljivu sliku.

**Tekući kristali** (organske tvari koje u tekućem stanju pokazuju optičku anizotropiju) promjenom temperature mijenjaju boju na osnovi različite apsorpcije dviju polariziranih zraka upadnog zračenja. Obasjani infracrvenim zračenjem mijenjaju temperaturu, a neapsorbirana komponenta se reflektira ili lomi pod kutom ovisnim o temperaturi kristalnog elementa. Tako nastaju različite boje vidljivog dijela spektra koje su u jednoznačnoj vezi s temperaturom tekućeg kristala. Najbolja svojstva u tom smislu pokazuju esteri kolesterola.

### PROSTIRANJE INFRACRVENOG ZRAČENJA

**Materijali za infracrveno zračenje.** Materijali za optičke sustave, predviđene za rad u infracrvenom području, moraju imati ili veliku propusnost (za leće i prizme) ili veliku reflektivnost (za zrcala). Ta svojstva, nadalje, moraju biti stabilna, te moraju biti prikladna za obradu. Za sve te optičke sustave upotrebljavaju se posebne vrste stakala, prirodni i sintetski kristali, sintetski (plastični) materijali i sl.

**Staklo i kremen.** Obična optička stakla, predviđena za svjetlo, mogu se upotrijebiti i u bližem infracrvenom području, do  $\lambda \sim 2,7 \mu\text{m}$ . Kremen (kvarc) se upotrebljava za izradbu prizama u spektroskopskim uređajima do  $\lambda \sim 3,5 \mu\text{m}$ , te za izradbu prozora do  $\lambda \sim 5 \mu\text{m}$ . Dodavanjem oksida teških metala silikatnim i baritnim staklima povećava se propusnost takvih stakala do  $\lambda \sim 2 \dots 5 \mu\text{m}$ . Tako, npr., propusnost stakla  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}/\text{ZnO}$  za infracrveno zračenje  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  iznosi 60–80%. Još je bolja propusnost stakla  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}/\text{MgO}$ , koje za isto zračenje ima propusnost 80%, a staklo  $\text{BeF}_2/\text{KF}/\text{AlF}_3$  čak 95%. Nadalje, sulfoselenidna stakla za zračenje  $\lambda \sim 1,5 \dots 10 \mu\text{m}$  ima propusnost  $\sim 70\%$ . U području tzv. atmosferskih prozora za infracrveno zračenje  $\lambda = 3 \dots 5 \mu\text{m}$  i  $\lambda = 8 \dots 14 \mu\text{m}$  upotrebljavaju se stakla  $\text{Si}/\text{As}/\text{Te}$ , a stakla  $\text{Ge}/\text{P}/\text{S}$  propusna su za područje  $\lambda \sim 5 \dots 7 \mu\text{m}$ , te se odlikuju temperaturnom stabilnošću do  $T \sim 800 \text{K}$ . Zbog svojih mehaničkih svojstava stakla i kremen su prikladni za izrađivanje optičkih elemenata za infracrveno zračenje.

**Kristalni materijali.** Različiti kristali veoma su prikladni za izradbu optičkih elemenata za infracrveno zračenje. Prizme spektroskopa izrađuju se od kristala  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ , i  $\text{KBr}$ , propusnih za područje  $\lambda \sim 20 \dots 30 \mu\text{m}$ , ali su takvi kristali lako topljivi u vodi. Kristal  $\text{LiF}$  služi za izradbu prozora i leća do  $\lambda \sim 6 \mu\text{m}$ , slabo je topljiv u vodi,  $\text{CaF}_2$  do  $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$ , netopljiv je u vodi, a može se dobiti i sintetski. Kristal  $\text{Al}_2\text{O}_3$  upotrebljava se u području do  $\lambda \sim 5,5 \mu\text{m}$ , netopljiv je u vodi, a zbog velike mehaničke otpornosti i dobrih toplinskih svojstava služi za izradbu prozora na uređajima i instrumentima za infracrveno zračenje. Bromidi i jodidi (npr.  $\text{CsBr}$  i  $\text{CsI}$ ) propusni su do  $\lambda \sim 40 \mu\text{m}$ , vrlo su higroskopični, te se mogu upotrebljavati samo u laboratorijskim uvjetima rada.

Kristali germanija i silicija potpuno su neprozirni u vidljivom dijelu spektra. Germanij je propustan za zračenje  $\lambda > 1,8 \mu\text{m}$ , a silicija za  $\lambda > 1 \mu\text{m}$ . Propusnost im ovisi o čistoći. Zbog kemijske otpornosti i netopljivosti u vodi germanij i silicij upotrebljavaju se za izradbu prozora, filtara i leća za infracrveno zračenje. Posebno su prikladni za upotrebu polikristali *Irtran* (engl. *infrared transmitter*) zbog njihovih dobrih mehaničkih svojstava, temperaturne otpornosti i netopljivosti u vodi.

**Sintetski (plastični) materijali.** Vrlo tanke ploče od ovih materijala (folije) propusne su i za infracrveno zračenje, ali ploče debele nekoliko milimetara propuštaju samo zračenje  $\lambda \sim 3 \dots 4 \mu\text{m}$ . Primjenjuju se za izradbu asferičnih optičkih elemenata, ali je zbog temperaturne aberacije njihova primjena ograničena.

**Materijali za reflektirajuće površine.** Visoku reflektivnost imaju tanki slojevi odgovarajućih materijala, nanoseni na osnovnu površinu. Srednji koeficijent refleksije zlata, srebra, aluminija i bakra u bližem infracrvenom području veći je od 95%. Najbolja fizikalna i kemijska svojstva ima zlato, srebro vremenom tamni, a najviše se upotrebljava aluminij koji se lako nanosi i zaštićuje slojem kvarca. Za selektivnu refleksiju upotrebljavaju se interferencijski filtri.

**Prostriranje infracrvenog zračenja kroz atmosferu.** Pri prolazu infracrvenog zračenja kroz atmosferu dolazi do selektivne apsorpcije u molekulama plinova i vodene pare. Dušik, kisik i plemeniti plinovi prozirni su za infracrveno zračenje, a ugljični dioksid, ozon i vodena para jaki su apsorberi u pojedinim područjima valnih duljina. Za  $\lambda = 0,8 \dots 4,0 \mu\text{m}$  najveći apsorber je vodena para. Apsorpcijske linije vode su 0,92, 1,13, 1,40, 1,88, 2,7, 3,2 i  $6,3 \mu\text{m}$ . Voda i ugljik-dioksid apsorbiraju  $\lambda \sim 4 \dots 8 \mu\text{m}$ . Ugljik-dioksid je izraziti apsorber za zračenje valnih duljina 2,7, 4,3 i  $14,5 \mu\text{m}$ . Najizraženija apsorpcijska linija ozona jest  $9,6 \mu\text{m}$ , ali njegov se utjecaj zbog malih količina u atmosferi može zanemariti.

Područja u kojima atmosfera dobro propušta infracrveno zračenje, tzv. infracrveni prozori, na valnim su duljinama:  $0,95 \dots 1,05$ ,  $1,2 \dots 1,3$ ,  $1,5 \dots 1,8$ ,  $2,1 \dots 2,4$ ,  $3,3 \dots 4,2$ ,  $4,5 \dots 5,1$  i  $8 \dots 13 \mu\text{m}$ .

Propusnost atmosfere raste s visinom zbog manje gustoće zraka i manje količine pare. Za  $\lambda \sim 14 \dots 600 \mu\text{m}$  uglavnom je kontinuirana apsorpcija vodenom parom. Voda u tekućem stanju, u sloju debljem od milimetra, neprozirna je za infracrveno zračenje  $\lambda > 2 \mu\text{m}$ .

Magla dobro propušta infracrveno zračenje, bolje nego svjetlost, a to je posljedica uzajamnog djelovanja raspršenja i apsorpcije na kapljicama vode u zraku. Po kiši, snijegu i tuči infracrveno zračenje jednako se raspršuje i apsorbera kao i svjetlost.

### PRIMJENA INFRACRVENOG ZRAČENJA

Primjena infracrvenog zračenja, tzv. infracrvena tehnika, počela se znatnije razvijati tek u drugom svjetskom ratu. Posebno se razvila primjena u vojne svrhe, za snimanje terena iz aviona ili umjetnih satelita, te industrijsku kontrolu, posebno za kontroliranje elektroničkih mikroelemenata.

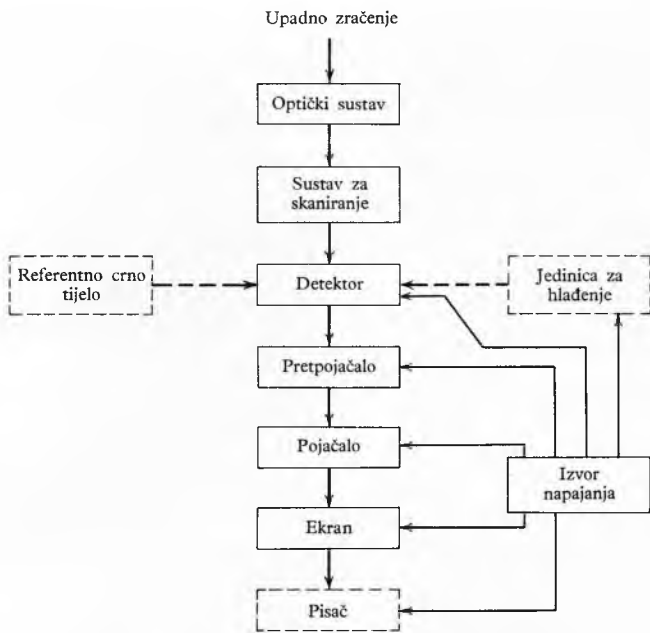
**Mjerni instrumenti.** Svi instrumenti za mjerenje infracrvenog zračenja mogu se razvrstati u dvije osnovne skupine: spektrometri i radiometri.

**Spektrometri** su instrumenti za mjerenja na pojedinim duljinama vala. Upotrebljavaju se prilikom istraživanja molekularnih struktura kemijskih komponenata.

**Radiometri** mjere ukupno zračenje emitirano unutar određenog dijela spektra. Mjerenjem izlaznog signala može se odrediti apsolutno ili relativno neka karakteristika infracrvenog zračenja koje ulazi u vidno polje detektora.

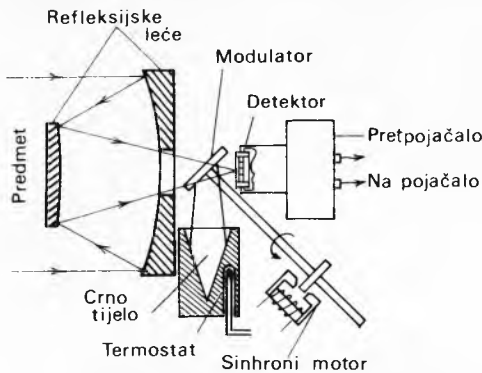
**Daljinsko mjerenje temperature.** Tipičan uređaj za daljinsko mjerenje temperature infracrvenim zračenjem prikazan je na sl. 5. Optički sustav skuplja upadno zračenje i dovodi ga na detektor. Pri radu s infracrvenim zračenjem povoljniji su refleksijski nego refrakcijski sustavi, zbog akromatskih svojstava, manjih gubitaka i jednostavnije proizvodnje. Općenito se optički sustavi mogu razvrstati na teleskope i mikroskope. Njihovi nedostaci i ograničenja fizičke prirode uzrokovani su izborom prikladnog materijala, obradom površine, centriranjem itd. Detektor mora imati direktan pogled na predmet iz kojega dolazi zračenje. Nekada se to omogućuje upotrebom svjetlovoda. To su transparentni linearni elementi kroz koje se zračenje širi unutrašnjim totalnim refleksijama.

U radiometre se često ugrađuje modulator koji prekida tok zračenja. Na taj se način istosmjerni signal pretvara u izmje-



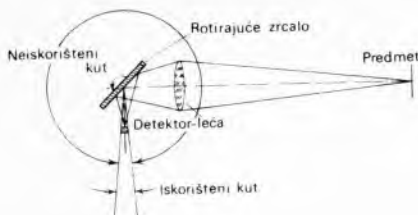
Sl. 5. Blok-shema uređaja za daljinsko mjerenje temperature infracrvenim zračenjem

nični, koji se jednostavnije elektronički obrađuje (pojačava, zapisuje itd.). Za vrijeme dok je modulator zatvoren detektor prima zračenje referentnog crnog tijela. Na sl. 6 prikazan je modulator, ugrađen u refleksijski optički sustav. Modulator je zrcalo koje rotira.



Sl. 6. Rotirajuće zrcalo kao modulator infracrvenog zračenja, smješteno u refleksijski optički sustav

Sustav za skaniranje omogućuje diskretno mjerenje zračenja koje dolazi s različitih mjesta na predmetu koji zrači. Skanira se pomicanjem detektora, predmeta, optičkog polja ili slaganjem tih metoda. Od toga je najpovoljnije pomicanje optičkog polja pomoću oscilirajućih ili rotirajućih zrcala (sl. 7) ili prizmi. Kao element za skaniranje može poslužiti i stakleni svjetlovod propustan za infracrveno zračenje.



Sl. 7. Rotirajuće zrcalo kao skaner za infracrveno zračenje

Detektor je najbitniji dio uređaja za daljinsko mjerenje temperature. Može se upotrebljavati pojedinačno, u parovima, ili više detektora raspoređenih na pravcu ili na ravnini. Ako se upotrebljava samo jedan detektor, on izmjenično prima zra-

čenje od predmeta kojemu se mjeri temperatura i od referentnog crnog tijela. U paru detektora jedan prima zračenje s predmeta, a drugi zračenje okolice. Višestruki detektori primjenjuju se u sustavima za brzo skaniranje. Najčešće upotrebljavani detektori jesu termistori, bolometri, piroelektrični bolometri, ćelije InAs, PbS, InSb, (Hg—Cd)Te, germanijske ćelije dopirane zlatom, živom ili bakrom, i germanijska lavinska fotodioda. Rade na vrlo niskim temperaturama ( $T \sim 77\text{K}$ ).

Informacija u obliku električnog signala obrađuje se elektronički. Postoji više mogućnosti za prikazivanje informacije o termičkoj slici predmeta. To su ekrani katodne cijevi, fotografska snimka i izotermske mape. No u svim njima ostaje neriješen problem prikazivanja trodimenzionalnog predmeta (njegovih toplinskih svojstava) u ravnini ekrana ili snimke.

**Infracrveni radiometri.** Radiometri se svrstavaju prema načinu rada, vrsti zračenja, optičkom sustavu i načinu promatranja predmeta. Osnovne su grupe u tabl. 2. Za radiometar se navodi nekoliko važnih karakteristika: *prostorno razlučivanje* — definirano kao površina najmanjeg elementa kojemu se još može mjeriti zračenje; *temperaturno razlučivanje* — definirano

Tablica 2  
VRSTE RADIOMETARA ZA INFRACRVENO ZRAČENJE

Detektor	Detektira zračenje	Vidno polje	Optički sustav
Točkasti detektor	polikromatsko	stacionarno	teleskop
Infracrveni mikroskop	„	„	mikroskop
Točkasti detektor	„	„	jednostruki svjetlovod
Linijski skaner	„	linijski skanirano	teleskop
Rasterski skaner	„	plošno skanirano	teleskop
Skanirajući mikroskop	„	plošno skanirano	mikroskop
Isparivač	„	stacionarno	teleskop
Detektor za dvije frekvencije	dviju frekvencija	ploha	teleskop
Detektor male ploštine	„	ploha	višestruki svjetlovod
Točkasti detektor	rekombinacijsko	ploha	jednostruki svjetlovod

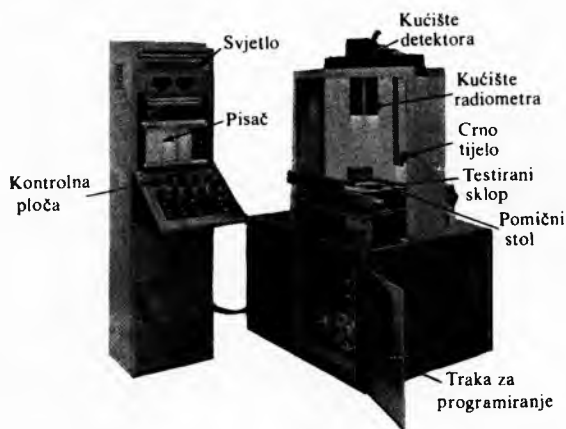


Sl. 8. Radiometar s točkastim detektorom infracrvenog zračenja

kao najmanji temperaturni gradijent koji se još može detektirati: vrijeme odgovora radiometra, koje mora biti usklađeno s brzinom termičkih promjena koje se žele mjeriti i sposobnostima sustava za skaniranje.

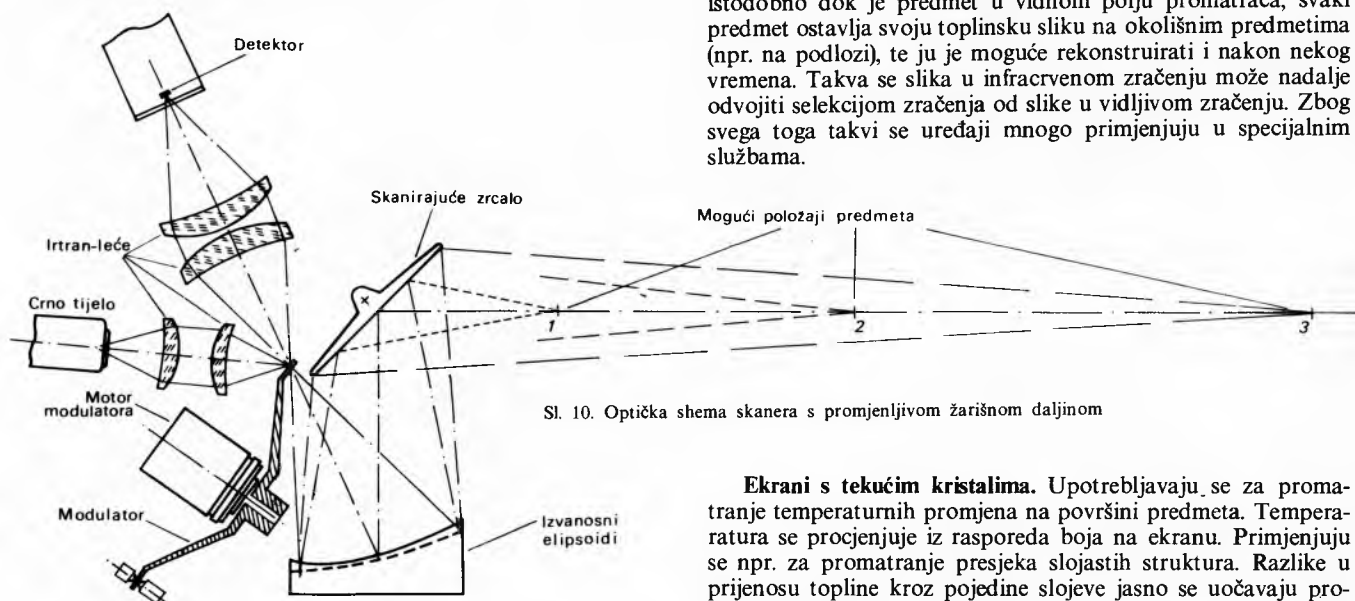
**Točkasti detektor** je najjednostavniji radiometrijski sustav. Refleksijski optički element skuplja infracrveno zračenje i usmjerava ga na termistorski bolometer. Točkasti detektor (sl. 8) ima malu moć razlučivanja, a primjenjuje se za otkrivanje grubljih termičkih oštećenja elektroničkih elemenata.

**Detektor za mjerenje plošne raspodjele zračenja** upotrebljava točkasti detektor za skaniranje dvodimenzionalne plohe (sl. 9). Detektor miruje, a istraživani predmet se pomiče prema zadanom programu. Njegova je moć temperaturnog razlučivanja 0,1K. Primjenjuje se za ispitivanje elektroničkih sklopova.



Sl. 9. Izgled automatskog uređaja za ispitivanje elektroničkih elemenata i mikroskopova infracrvenim zračenjem

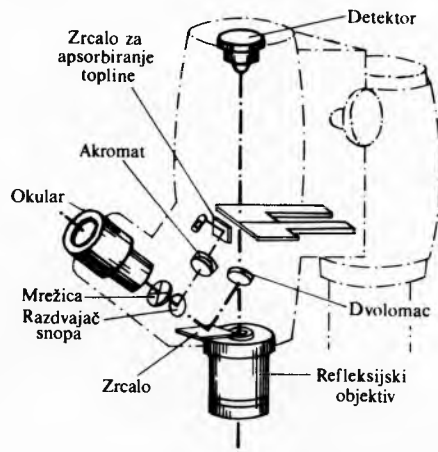
**Infracrvena kamera tipa Linescan.** U kameri tipa Linescan (sl. 10) vidno polje skanira uzduž jedne, stacionarne linije. Za skaniranje dvodimenzionalnog polja pomiče se cijeli radiometar linearno ili radijalno. Nakon reflektiranja na ravnom zrcalu za skaniranje upadno zračenje pada na eliptičko zrcalo izvan osi, koje ga skuplja u ravnini modulatora. Posredna ga leća dalje usmjerava na detektor. Izmjenom eliptičkih zrcala može se mijenjati žarišna daljina optičkog sustava.



Sl. 10. Optička shema skanera s promjenjivom žarišnom daljinom

**Infracrveni mikroskop.** Za promatranje vrlo malih predmeta mora se primijeniti mikroskopski optički sustav. Osnovni dijelovi takvog infracrvenog mikroskopa jesu: *detektorski stupanj*, u kojemu se nalaze mikroskopski optički sustav, detektor

i spremnik za hlađenje, i *kontrolni stupanj* s elektroničkim sklopovima za pojačavanje, filtriranje i demoduliranje signala za prikazivanje na ekranu katodne cijevi. Mikroskop (sl. 11) je točkasti detektor, te se zbog skaniranja predmet mora pomicati. Prostorno je razlučivanje  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  lučnih sekunda.



Sl. 11. Optička shema mikroskopa za infracrveno zračenje

**Infracrveni uređaj za kontrolu kvalitete varova.** Taj uređaj radi kao radiometar za dvije valne duljine infracrvenog zračenja. Na taj se način mjeri temperatura predmeta neovisno o emisivnosti njegove površine. Njime se kontrolira kvaliteta vara pri spajanju elektroničkih elemenata. Infracrveno se zračenje za vrijeme zavarivanja svjetlovodom vodi na dva odvojena detektora, a valne se duljine odabiru filtriranjem. Temperatura se prikazuje u realnom vremenu preko sustava boja (sl. 12).

#### Pretvarači infracrvenog u vidljivo zračenje

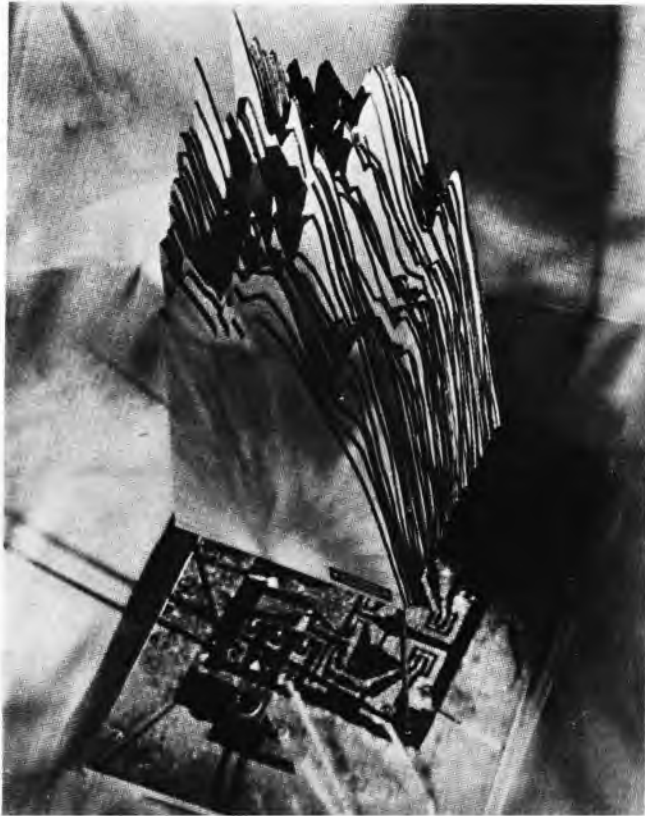
Uređaji koji infracrveno zračenje objekta pretvaraju u vidljivo primjenjuju se za promatranje temperaturnih promjena na površini predmeta ili za stvaranje vidljive slike promatranog predmeta kad on nije osvijetljen, ili kad su nepovoljne prilike za prostiranje svjetla. Za razliku od promatranja predmeta u svjetlu, koje ne ostavlja nikakve tragove, a moguće je samo istodobno dok je predmet u vidnom polju promatrača, svaki predmet ostavlja svoju toplinsku sliku na okolišnim predmetima (npr. na podlozi), te ju je moguće rekonstruirati i nakon nekog vremena. Takva se slika u infracrvenom zračenju može nadalje odvojiti selekcijom zračenja od slike u vidljivom zračenju. Zbog svega toga takvi se uređaji mnogo primjenjuju u specijalnim službama.

**Ekran s tekućim kristalima.** Upotrebljavaju se za promatranje temperaturnih promjena na površini predmeta. Temperatura se procjenjuje iz rasporeda boja na ekranu. Primjenjuju se npr. za promatranje presjeka slojastih struktura. Razlike u prijenosu topline kroz pojedine slojeve jasno se uočavaju promjenom boja u slici na ekranu.

**Infracrvena fotografija.** Primjenjuje se za snimanje u bliskom području infracrvenog zračenja, a to znači da se tako mogu snimiti predmeti na visokim temperaturama. U srednjem području infracrvenog zračenja osjetljivost fotografskog materijala

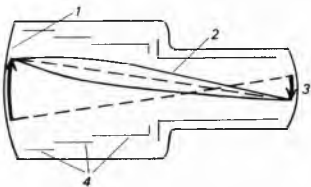


opada, te se mora produžavati trajanje eksponiranja. Infracrvena fotografija prema fotografiji sa svjetlom ima prednost zbog veće prozirnosti atmosfere za infracrveno nego za vidljivo zračenje, i što se može snimiti uz maglu, a posebno noću. Omogućuje i naknadno snimanje infracrvenog traga predmeta na okolici (v. *Fotografija*, TE5, str. 581).



Sl. 12. Trodimenzionalni model infracrvene slike integriranog elektroničkog sklopa načinjen sa 50 linija skaniranja

**Infracrveni konvertori.** *Infracrvena konvertorska cijev* ili infracrveni teleskop omogućuje direktnu pretvorbu infracrvene slike u vidljivu; pojednostavljen presjek kroz konvertorsku cijev prikazan je na sl. 13. Infracrveno zračenje nekog predmeta projicira se optičkim sustavom na ulazni ekran. S unutrašnje je strane sloj osjetljiv na infracrveno zračenje, u kojemu ono, proporcionalno intenzitetu, fotoefektom izbija elektrone. Taj sloj je fotokatoda cijevi. U cijevi se nalazi niz prikladno raspoređenih elektroda, pozitivnih prema fotokaturi. Električna polja su leće za mlaz elektrona koji izlazi iz fotokature (v. *Elektronska optika*, TE5, str. 1; v. *Elektronski mikroskop*, TE5, str. 6), te ga projicira na ekran na drugoj strani cijevi, koji fluorescira. Na taj se način posredovanjem elektronskog mlaza i elektronskih leća infracrvena slika projicira i pretvara u vidljivu.



Sl. 13. Infracrvena konvertorska cijev

Infracrveni konvertori osjetljivi su u bliskom području infracrvenog zračenja, do  $\lambda \sim 1,2\mu\text{m}$ , pa se njima mogu promatrati predmeti na višim temperaturama (npr. motori u radu, ugrijane cijevi oružja), ili predmeti obasjani takvim zračenjem.

*Uređaj za promatranje (ili promatralo) termičke slike* (engl. thermal imager) omogućuje direktno promatranje velikog vidnog polja s prilično velikim razlučivanjem. Uređaj sadrži ne-



Sl. 14. Izgled uređaja za promatranje termičke slike (Thermal imager tvrtke Hawker-Siddeley Dynamics)

koliko desetaka detektora, npr. 50. Kao detektor upotrebljava se npr. sustav kadmij-živa-telur. Detektori su postavljeni u nizu, te se odjednom skanira svih 50 linija. Detektorski niz u više redova, npr. 11, prelazi čitavo polje, te je tako slika sastavljena od 550 linija. Brzina skaniranja je velika, pa se kod nekih uređaja stvara 25 slika u sekundi. Zbog toga slika sadrži mnogo detalja (v. prilog u bakrotisku).

LIT.: J. A. Jamieson, R. H. McFee, G. N. Plass, R. H. Grube, R. G. Richards, *Infrared physics and engineering*. McGraw-Hill, New York 1963. — B. B. Колекин, П. Ф. Усоицев, *Основы инфракрасной техники*. Машиностроение. Москва 1967. — M. A. Bramson, *Infrared radiation*. Plenum Press, New York 1968. — D. Hudson, *Infrared system engineering*. John Wiley and Sons, New York 1969. — R. Vanzetti, *Practical applications of infrared techniques*. John Wiley and Sons, New York 1972. — J. M. Lloyd, *Thermal imaging systems*. Prentice-Hall, New York 1975.

A. Peršin M. Žaja

**INJEKTIRANJE**, postupak za ispunjivanje, brtvljenje, konsolidaciju, očvršćivanje i učvršćivanje prirodnih stijena, tla i građevina. U stijene ili tlo ubrizgavaju se pod tlakom različita stabilizacijska sredstva (veziva, punila i aditivi) radi konsolidacije i da se smanji vodopropusnost, poveća čvrstoća, smanji deformabilnost, ispune kontaktne reške između temelja građevine i tla te fiksiraju sidra.

Injektiranje se primjenjuje također za spajanje diskontinuiranih dijelova građevina izgrađenih od pojedinačnih betonskih elemenata, fiksiranje armatura i zatega za prednapinjanje građevnih konstrukcija, asanaciju temelja i objekata u građevinarstvu i rudarstvu, i pri izradbi prepekt-betona.

Injektiranje je relativno nov postupak. U građevinarskoj ga je prvi primijenio Francuz Ch. Berigny godine 1802. za sanaciju splavnice u Dieppeu. Splavnica je bila plitko temeljena na šljunkovitom tlu, pa je zbog jakih procjeđivanja temeljno tlo erodiralo i prijetila je opasnost od rušenja. Kroz izbušene rupe na zagatnom zidu na razmacima od po 1 metar utiskivana je plastična gлина jednostavnom udarnom crpkom. Ista je metoda primijenjena i ispod temeljne ploče splavnice, ali se umjesto gline u bušotine utiskivao pucolanski mort. To je prvo injektiranje uspjele i splavnica je nakon sanacije ponovno bila u pogonu.

Godine 1838. ispunjavale su se prvi puta pukotine injektiranjem u kamenom zidu brane Grosbois. Poboľšanom udarnom crpkom utiskivala se u pukotine suspenzija veziva pod konstantnim tlakom.

Pri gradnji tunela pomoću štita godine 1864. P. W. Barlow je predvidio ispunu prostora između obloge i iskopanog tla injektiranim cementnim mortom. Taj se postupak kasnije često primjenjivao pri gradnji tunela pod vodom za londonsku i parišku podzemnu željeznicu, a injektiralo se pomoću rezervoara s komprimiranim zrakom.

W. R. Kinipole je primijenio utiskivanje suspenzija gline i cementnog morta u bušotine i tim postupkom godine 1896. riješio problem procjeđivanja vode ispod temelja brane Damietta i Rosetta na ušću Nila u Sredozemno more. U to doba pri gradnji brana i splavnica na Nilu prvi put se pod vodom injektirao šljunak s cementnim mortom (prepekt-postupak).

Injektiranje se mnogo primjenjuje u rudarstvu za sprečavanje prolaza vode kroz slojeve u blizini rudarskih okana. Od godine 1904. mjeri se vodopropusnost, a od 1910. upotrebljavaju se manometri za mjerenje tlaka. U isto vrijeme prilikom gradnje brana mjeri se propusnost ispod temelja i procjenjuje se raspadlost stijene mjerenjem dotoka vode u bušotine.