

ONEČIŠĆENJE ATMOSFERE U ZATVORENIM PROSTORIMA

K. Š E G A

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

(Primljeno 17. II 1983)

Istaknuta je važnost onečišćenja unutrašnje atmosfere pri ocjenjivanju osobne izloženosti stanovnika štetnim tvarima u zraku.

Dan je pregled najčešćih polutanata unutrašnje atmosfere i navedeno njihovo porijeklo. Opisana je sudbina polutanata u zatvorenom prostoru i prikazan način matematičkog modeliranja vremenskog toka iznosa koncentracije uz poznate početne uvjete.

Naglašena je veza između težnje za očuvanje energije i zahtjeva za kvalitetu unutrašnje atmosfere, te opisan utjecaj prirodne i prisilne ventilacije na onečišćenje zraka u zgradama.

Opisan je sindrom »nezdravih zgrada«, njegovi uzroci i prikazan tip zgrada u kojima se javlja.

Navedeni su mogući načini utjecaja na kvalitetu unutrašnje atmosfere, te potrebna saznanja koja bi dovela do definiranja standarda pri projektiranju i gradnji.

Kada se govori o atmosferi zatvorenog prostora, najčešće se misli na atmosferu radnog prostora u kojem dolazi do izražaja profesionalna izloženost specifičnim polutantima koji se javljaju kao posljedica proizvodnog procesa. Ovaj se pregled ne odnosi na taj problem, već razmatra onečišćenje unutrašnje atmosfere stambenog i poslovnog prostora, zgrada javnih službi, trgovine, ugostiteljstva itd. Kako se radi o istraživanju životne, a ne radne okoline, rezultati i iz njih izvedeni zaključci su važni za cjelokupno stanovništvo zemlje, a ne samo za mali krug ljudi određenih profesija.

Donedavno su za ocjenu izloženosti stanovnika služili podaci o onečišćenju atmosfere otvorenog prostora na području gdje ljudi žive. Problem onečišćenja unutrašnje atmosfere, znači zatvorenog prostora u kojem ljudi borave najveći dio vremena, bio je zanemaren. Veza između ta dva vida onečišćenja zraka nije ni jednostavna ni izravna, a za pojedine polutante koji se javljaju samo u unutrašnjoj atmosferi i ne postoji.

Interes za kvalitetu zraka u zatvorenim prostorijama naglo je porastao kao posljedica težnje za štednju energije (1). Zbog smanjenja potrošnje goriva za grijanje prostorija poboljšana je toplinska izolacija zgrada, čime je smanjeno prirodno provjetravanje. Zbog istih razloga smanjen je i intenzitet prisilne ventilacije i povećan udio zraka koji se recirkulira, pa se nužno nametnula bojazan da će doći do nagomilavanja onečišćenja koja nastaju unutar zgrada. S druge strane, materijali upotrijebljeni za izolaciju mogu otpuštati štetne tvari u obliku plinova i para (npr. formaldehid) ili čestica (azbest).

I konačno, u mnogim su se zemljama stanovnici i namještenici koji su boravili u velikim dobro izoliranim stambenim i poslovnim zgradama s prisilnom ventilacijom, tužili na objektivne i subjektivne poteškoće vezane za boravak u tim zgradama (2, 3), pa je nastao pojam »nezdravih zgrada« (sick building sindrom).

Utvrđeno je da se postotak vremena što ga ljudi provode u zatvorenom prostoru kreće od 50% u poljoprivrednika, šumskih radnika, građevinskih radnika i sličnih struka, pa sve do 100% u mladih majki, dječadi, bolesnika i staraca, pogotovo za vrijeme zimskog perioda (1). Prosječno vrijeme boravka u zatvorenom prostoru za odrasle ljude u gradovima umjerenog pojasa kreće se od 75 do 85% i taj podatak govori o važnosti izučavanja onečišćenja unutrašnje atmosfere pri procjeni osobne izloženosti stanovnika štetnim tvarima u zraku. Navedeni se podatak spominje u stručnoj literaturi (4), a i mi smo ga potvrdili prilikom određivanja osobne izloženosti stanovnika Zagreba aerosolima i ugljik-monoksidu (5). Sve promatrane osobe provodile su najviše vremena kod kuće (50—70%). U osoba u radnom odnosu na drugom je mjestu po količini provedenog vremena bio boravak na radnom mjestu (približno 25%).

Boravak u zatvorenom prostoru može se grubo podijeliti u nekoliko skupina:

- boravak u stambenom prostoru
- boravak na radnom mjestu
- boravak u javnim zgradama (pošte, banke, trgovine, zgrade upravnih službi, ugostiteljski objekti itd.)
- boravak u vozilima prilikom transporta.

Svaka od ovih skupina predstavlja zaokruženu cjelinu određenih karakteristika kao što su vrste izvora onečišćenja zraka, vrste polutanata, vjerojatno vrijeme zadržavanja osobe u danoj okolini itd. Neke od karakteristika, kao npr. stupanj provjetravanja prostorije, variraju ovisno o načinu izgradnje zgrade, godišnjem dobu, općim klimatskim uvjetima itd.

Broj mogućih polutanata u unutrašnjoj atmosferi nadmašuje njihov broj u vanjskoj atmosferi, a kako ljudi provode u zatvorenom prostoru velik dio vremena, izučavanje unutrašnje atmosfere prilikom određivanja osobne izloženosti stanovnika ima primarnu važnost.

Specifično djelovanje pojedinih polutanata na zdravlje je poznato, no s obzirom na to da se kod onečišćenja atmosfere radi o dugotrajnom djelovanju vrlo niskih koncentracija uz istovremenu prisutnost drugih utjecajnih faktora, teško je donositi zaključke na osnovi rezultata akutnih trovanja za koja postoje klinički rezultati ili rezultati pokusa na životinjama. Longitudinalna epidemiološka istraživanja teško je opet provesti zbog stalnih promjena u prisutnosti i razinama kako interferirajućih faktora tako i faktora djelovanja kojih promatramo. Utjecaj ovih elemenata ublažuje se usporedbom promatrane skupine s kontrolnom i testiranjem značajnosti razlika u nalazima. Ali nije lako naći kontrolnu skupinu koja bi bila usporediva s promatranom skupinom u svim drugim elementima, osim u stupnju izloženosti štetnoj tvari djelovanje koje istražujemo.

Još veća poteškoća se javlja pri ocjeni djelovanja mješavine niskih koncentracija različitih polutanata, te njihovog mogućeg sinergističkog, odnosno antagonističkog djelovanja. Osim toga moguće su kemijske reakcije između polutanata koje mogu dovesti do formiranja novih onečišćenja sa snažnijim djelovanjem, bilo na ljude ili na okolinu.

Zbog toga je potrebno dobro proučiti karakteristike i ponašanje onečišćenja atmosfere zatvorenih prostora kako bi se uočili bitni problemi i našao optimalan pristup za njihovo rješavanje.

PORIJEKLO POLUTANATA

Porijeklo polutanata u unutrašnjoj atmosferi je raznoliko. Najčešći i najznačajniji izvori su ovi:

- a) sagorijevanje goriva
- b) aktivnosti stanara u zatvorenom prostoru
- c) otpuštanje štetnih tvari iz građevinskih, konstrukcijskih i izolacijskih materijala ili materijala upotrijebljenih za opremu stanova
- d) životinje, plijesni, pelud, produkti metabolizma ljudi
i ostala onečišćenja biološkog porijekla
- e) penetracija štetnih tvari iz vanjske atmosfere.

a) Sagorijevanje goriva zbog kuhanja i zagrijavanja stambenog i poslovnog prostora najčešći je uzrok onečišćenja unutrašnje atmosfere, no ujedno su to izvori na aktivnost kojih se može najlakše i najbrže utjecati. Ovisno o upotrijebljenoj vrsti goriva, konstrukciji peći i uvjetima izgaranja goriva nastaju različite vrste polutanata i različite razine njihovih koncentracija.

Peći na drvo, ugljen i tekuća goriva imaju redovito odvod sagorjelih plinova u dimnjak, pa samo u slučaju trošnog, neispravnog ili nepravilno projektiranog dimnjaka može doći do povrata plinova u prostoriju. Prema tome najčešći izvor onečišćenja zraka u prostorijama su plinske peći i bojleri bez odvoda dimnih plinova, i plinski štednjaci. Plin je relativno

čisto gorivo, pa se za male potrošače ranije nije smatralo potrebnim odvoditi plinove u dimnjak. Pokazalo se, međutim, da i pri izgaranju plina nastaju količine CO i NO_x koje se ne mogu zanemariti, tako da koncentracije u prostoriji mogu znatno premašiti vrijednosti koje bi se smjele tolerirati. Odsisne kape s recirkulacijom zraka preko filtra od aktivnog ugljena odstranjuju neugodne mirise koji se javljaju pri kuhanju, no ne uklanjaju sve plinovite polutante koji nastaju pri izgaranju plina. CO i NO su npr. permanentni plinovi i ne zadržavaju se na aktivnom ugljenu pri prolasku kroz filter, te stoga odsisne kape u kuhinjama doprinose samo prividnom poboljšanju kvalitete zraka.

b) Ljudske aktivnosti u zatvorenom prostoru razlikuju se po trajanju i učestalosti. Kretanje ljudi, spremanje stana i igra djece dovode do izrazitog porasta koncentracije lebdećih čestica u zraku, dok aktivnosti poput pranja, čišćenja, bojenja, upotrebe »sprayeva« za osobnu higijenu, tamanjenje insekata, laštenje namještaja i cipela i slično, dovode do kratkotrajnih vrlo visokih koncentracija organskih otapala, freona i drugih spojeva.

Pušenje je jedna od najagresivnijih navika, jer sagorjevnim plinovima cigareta nije izložen samo pušač nego i ostale osobe koje se nalaze u istoj prostoriji. Pušenje dovodi do porasta koncentracija lebdećih čestica, CO₂, CO, NO_x, SO₂ i niza organskih spojeva. Naročito visoke koncentracije se mogu doseći u barovima, kavanama i dvoranama za sastanke i konferencije u kojima pušenje nije zabranjeno. Utjecaj ovog vida onečišćenja na nepušače, a naročito na djecu i kronične bolesnike, nije zanemariv. Kao primjer navest ćemo podatke koje nalazimo u izvještaju Svjetske zdravstvene organizacije o osobnoj izloženosti ljudi (6). Izvršena su mjerenja ugljik-monoksida, ukupnih lebdećih čestica i 3,4 benzpirena u zraku prilikom masovnih skupova. Skupovi su podijeljeni u tri kategorije s obzirom na mjere koje su poduzete u vezi s očuvanjem kvalitete zraka u prostoriji:

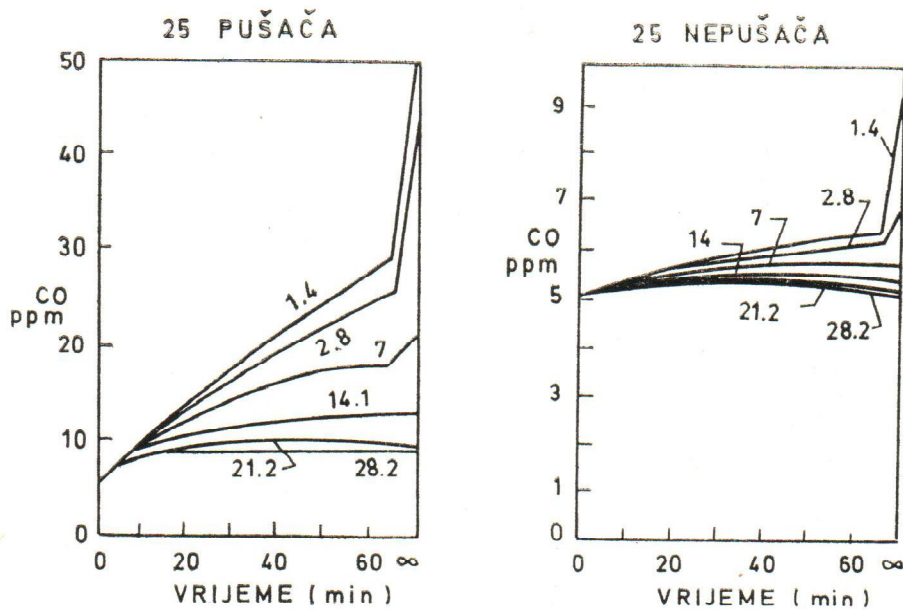
A — postoji sistem za klimatizaciju i znakovi o zabrani pušenja, no ne zahtijeva se striktno pridržavanje

B — ne postoji sistem za klimatizaciju, niti je pušenje zabranjeno

C — postoji sistem za klimatizaciju, znakovi o zabrani pušenja i traži se striktno pridržavanje te naredbe.

Rezultati prikazani na tablici 1. pokazuju da je kvaliteta zraka na masovnim skupovima općenito slaba, osobito ako ne postoji zabrana pušenja. U tim slučajevima koncentracije polutanata čak znatno nadmašuju koncentracije u vanjskoj atmosferi za vrijeme visokih razina onečišćenja.

c) Otpuštanje štetnih tvari iz raznih materijala za izgradnju ili izolaciju, te za izradu ili impregnaciju pokućstva, sagova, zastora i sl. također je izrazit problem koji je postao sve aktualnijim zbog primjene sintetskih materijala pri njihovoj proizvodnji i obradi.



Sl. 1. Proračun razina koncentracija ugljik-monoksida pri različitim uvjetima provjetravanja i pušenja. Volumen sobe je 85 m³. Iznosi provjetravanja su izraženi u m³ min⁻¹ (4)

Tablica 1.

Sadržaj lebdećih čestica, ugljik-monoksida i 3,4 benzpirena u zraku prilikom javnih skupova mjeren u tri različite dvorane (6)

Dvorana	Broj prisutnih ljudi	Lebdeće čestice (μg m ⁻³)		CO (mg m ⁻³)		3,4 benzi-peren (μg m ⁻³)	
		I	II	I	II	I	II
A	11 806	323	42	10,2	3,4	12,5	0,7
	8 647—10 786	224	42	9,2	3,4	7,1	0,7
	12 000—12 844	305	42	10,2	3,4	9,9	0,7
	13100—14277	481	42	11,5	3,4	21,7	0,7
B	2 000	620	92	28,6	3,4	—	0,7
C	11 000	148	71	10,2	3,4	—	0,7

I — u prisutnosti ljudi

II — bez prisutnosti ljudi prije skupa

Otpuštanje nekih polutanata je konstantno (npr. radona iz nekih vrsta cementa), dok u drugih opada s vremenom (npr. formaldehida). Na ovu skupinu onečišćenja zraka teško se može naknadno utjecati, već treba promjenama u proizvodnom procesu ili izborom sirovina dobiti materijale povoljnijih svojstava.

Za materijale koji postepeno prestaju otpuštati zamjetljive količine štetnih tvari potrebno bi bilo eksperimentalnim putem doći do podataka o minimalnom vremenskom periodu nakon kojeg možemo emisiju tih izvora smatrati zanemarivom.

d) Razina koncentracija polutanata iz ove skupine ovisi uglavnom o higijenskim uvjetima što vladaju u prostoriji kao i o mikroklimi. Povišenju koncentracije plijesni i bakterija pogoduju visoka vlažnost i malen broj izmjena zraka u jedinici vremena. U ovu skupinu možemo svrstati i proizvode ljudskog metabolizma kao što su CO₂, vodena para, razni vonjevi itd.

Porastom higijenskog standarda, naobrazbe, te napose pravilno organiziranim odgojnim akcijama, ovaj se vid onečišćenja zraka može gotovo potpuno ukloniti.

Onečišćenje zraka peludom ima izrazito sezonski karakter i spada u tip onečišćenja koje penetrira iz vanjske atmosfere.

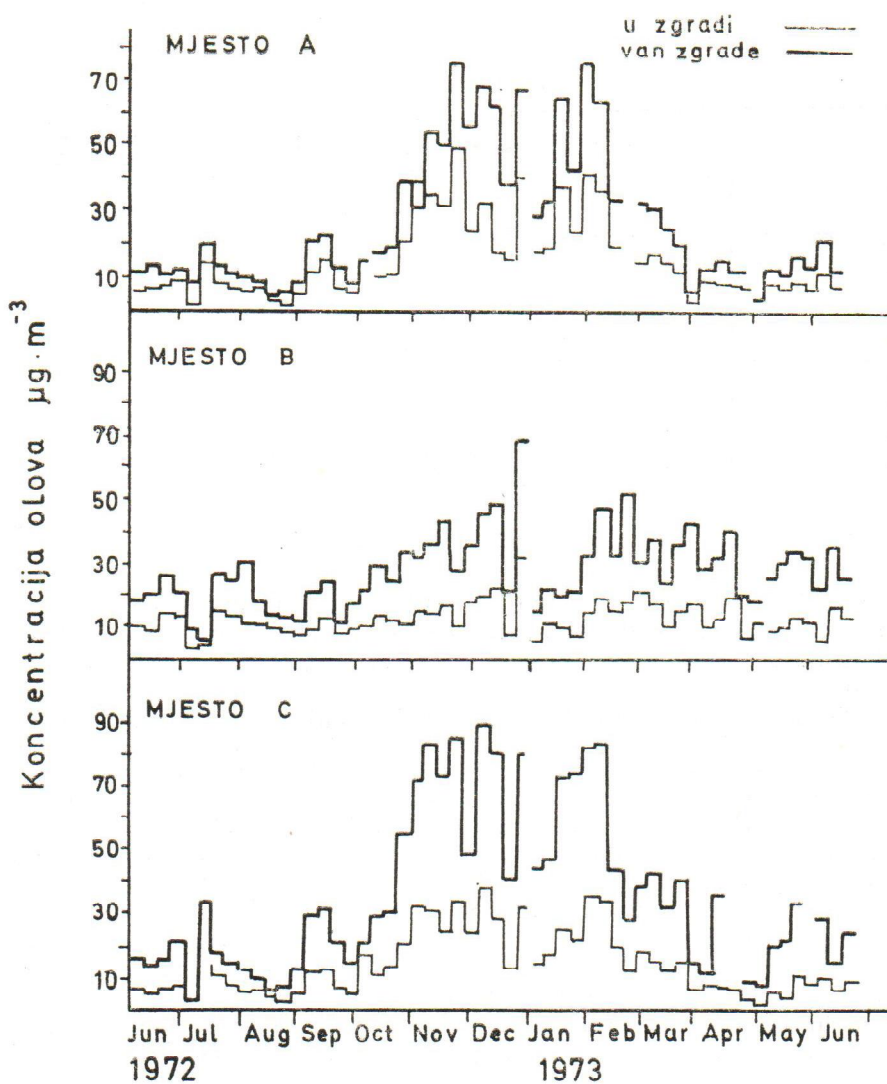
e) Svi prostori, ako nisu hermetički zabrtvljeni, izmjenjuju zrak u manjoj ili većoj mjeri s okolnom atmosferom infiltracijom i difuzijom. Osim prirodnim putem zrak izvana može ući u prostoriju i prisilnom ventilacijom.

Prirodni uvjeti odgovorni za prodiranje vanjskog zraka u zgradu su temperaturni gradijent, koji stvara razliku pritiska u zgradi i izvan nje, »efekt dimnjaka« koji se javlja kao posljedica vertikalnog strujanja toplog zraka unutar zgrade prema gore, jak vjetar i propuh.

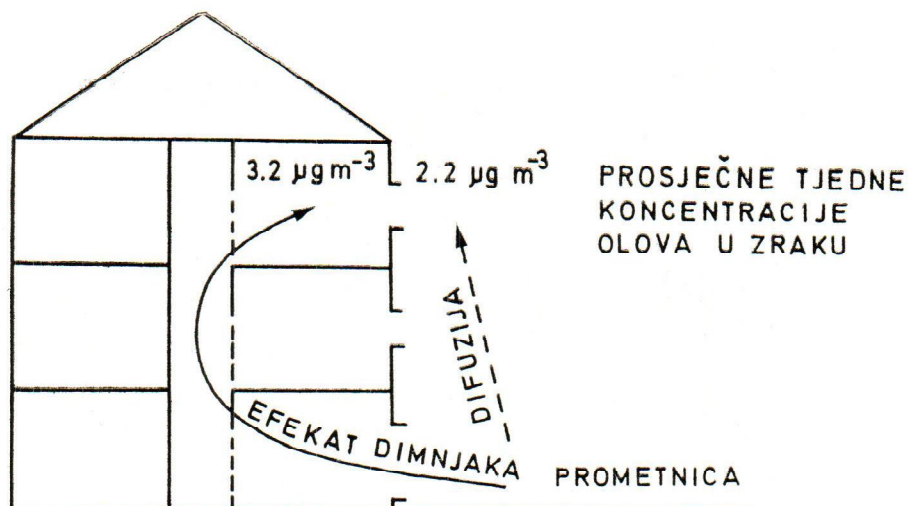
Izmjena zraka u zatvorenim prostorijama uslijed prirodne ventilacije, koja iznosi od 2 do 3 izmjene na sat u starijim i trošnim zgradama, do 0,2—0,7 izmjena na sat u modernim, dobro toplinski izoliranim zgradama, redovito nije dovoljno brza da bi zadržala koncentraciju polutanata prispjelih izvana na jednakoj razini s onom u vanjskoj atmosferi. To se dobro vidi na sl. 2. gdje je prikazano kretanje srednjih tjednih koncentracija olova u zraku tokom godine izvan i unutar prostorije u tri zgrade smještene u blizini talionice olova (7).

Na sl. 3. je prikazan odnos koncentracija olova na istoj visini u vanjskom zraku i u zraku jedne prostorije na drugom katu zgrade u uskoj i prometnoj ulici kao posljedica »efekta dimnjaka« (7).

Općenito se utjecaj vanjske atmosfere na unutrašnju atmosferu može dobro prikazati odnosom koncentracija pojedinih polutanata u prostoriji i izvan nje (tablica 2). Treba naglasiti da se ovdje radi o prosjecima i da su moguća odstupanja ovisno o specifičnim uvjetima. Tipični plinoviti polutanti koji prodiru iz vanjske atmosfere jesu SO₂ i O₃, ispušni plinovi



Sl. 2. Kretanje srednjih tjednih koncentracija olova u toku godine vani i u prostoriji u tri zgrade oko talionice olova (7)



Sl. 3. Primjer djelovanja »efekta dimnjaka« (7)

automobilskih motora i specifične emisije lokalne industrije. Lebdeće čestice i prašina također penetriraju izvana i pri tom mogu na sebi donijeti adsorbirane plinove koji se pri višoj temperaturi u prostoriji desorbiraju.

Prisilnom ventilacijom ubrzava se priljev vanjskog zraka u prostoriju, pa se smanjuje koncentracija polutanata kojih je izvor unutar prostorije, a povećava koncentracija onih polutanata koji prodiru izvana.

Poseban problem može predstavljati neprikladan smještaj ulaznog otvora ventilacijskog sistema kroz koji ulazi zrak za obnavljanje. Npr., smještaj u blizini izvora onečišćenja radikalno će pogoršati kvalitetu zraka u zgradi.

Ako se u uređajima za ventilaciju ili recirkulaciju upotrebljavaju elektrostatski precipitatori aerosola, tada se iz ulaznog zraka gotovo potpuno uklanjaju lebdeće čestice, no uvodi se ozon koji se stvara pri njihovom radu. Iako se koncentracija ozona zbog njegove reaktivnosti brzo smanjuje, upravo ta izražena reaktivnost (ozon je jak oksidans), kao i činjenica da precipitatori predstavljaju stalan izvor novih količina ozona, govori o ozbiljnosti tog problema.

SUDBINA POLUTANATA U ZATVORENOM PROSTORU

Ovisno o uvjetima koji vladaju u prostoriji koncentracije polutanata mogu padati ili rasti u odnosu na početno stanje. Što će se s polutanima događati u zatvorenom prostoru ovisi:

- a) o vrstama polutanata,
- b) o smještaju i karakteru izvora polutanata,
- c) o »ponorima« polutanata, tj. medijima i mehanizmima za njihovo spontano uklanjanje,
- d) o izmjeni zraka i stupnju miješanja zraka u prostoriji.

a) Poznavanje vrste polutanata je bitno jer govori o mogućim izvorima, o očekivanom fizičko-kemijskom ponašanju polutanata i o mogućim ponorima.

b) Izvori polutanata mogu biti smješteni unutar i/ili izvan prostorije. Prvi korak u proučavanju sudbine polutanata je identifikacija izvora i utvrđivanje njihovog smještaja, kapaciteta, trajanja (stalni, povremeni) i učestalosti njihove aktivnosti.

Ako je izvor smješten izvan prostorije, može već u toku penetracije doći do promjene fizičkih svojstava, do kemijske konverzije ili do selektivnog uklanjanja polutanata koji prodiru (vidi i poglavlje 2 e/).

c) Na koji će način polutanti biti uklonjeni iz zraka ovisit će o njihovoj reaktivnosti i agregatnom stanju. Neki od plinovitih polutanata lako se i brzo vežu adsorpcijom ili kemisorpcijom za zidove i druge površine (sagove, zavjese, premaze itd.) ili se razlažu (npr. ozon). Drugi koji su inertni razrjeđuju se miješanjem i postepeno gube difuzijom. Lebdeće čestice se postepeno talože, a ako dopru izvana kroz kanale, pore ili pukotine, onda se već putem djelomično uklanjaju pri čemu ne samo da im se snizuje koncentracija, nego dolazi i do izrazite promjene u spektru veličina čestica, a i kemijskog sastava. Promjene u temperaturi i vlažnosti zraka i elektrostatski efekti mogu pri tom imati znatnu ulogu.

d) Ako polutant koji nije reaktivan nastaje u prostoriji, njegovo se uklanjanje može pospješiti samo povećanim brojem izmjena zraka u jedinici vremena. U suprotnom slučaju polutant će se gomilati i njegova koncentracija može doseći znatne vrijednosti. Do gomilanja može doći i zbog znatnog udjela recirkuliranog zraka pri prisilnoj ventilaciji.

Dobro miješanje zraka omogućuje bolji kontakt onečišćenja s površinama koje služe kao ponor.

Sudbina polutanata u prostorijama može se definirati jednadžbama, ako se poznaju početni uvjeti i vrijednosti konstanti u proračunu. Da je određivanje relacije između onečišćenja vanjske i unutrašnje atmosfere, odnosno proračun sudbine polutanata, vrlo složen, ali i zanimljiv problem, svjedoči i velik broj novijih radova iz tog područja (8, 9, 10, 11, 12). Bit tih radova prikazat će se u idućem poglavlju.

MATEMATIČKI MODELI ODREĐIVANJA KONCENTRACIJA

Za održavanje potrebne kvalitete zraka u zatvorenom prostoru veoma je važna procjena i izučavanje koncentracija onečišćenja pri danim uvjetima kao što su volumen prostorije, stupanj provjetravanja, vrijeme aktivnosti izvora onečišćenja, njihova izdašnost itd.

Tablica 2.
Izvori, moguće koncentracije i omjer koncentracija unutar i izvan zgrade
(U/V) za neke vrste onečišćenja (27)

Vrsta onečišćenja	Izvor onečišćenja u zatvorenom prostoru	Moguće koncentracije u zatvorenom prostoru	
CO	Sagorijevanje goriva	115 mg m ⁻³	>> 1
Respirabilne čestice	Peći, pušenje, kondenzacija, sprayevi, kuhanje		>> 1
Organske pare	Sagorijevanje, organska otapala, pesticidi, sprayevi	—	> 1
NO ₂	Sagorijevanje, plinske peći i štednjaci, motori s unutrašnjim sagorijevanjem, pušenje	200–1000 μg m ⁻³	>> 1
SO ₂	—	20 μg m ⁻³	< 1
Čestice koje ne dolaze od pušenja	Sagorijevanje u sistemima za grijanje	100 μg m ⁻³	1
Sulfati	Šibice, plinske peći	5 μg m ⁻³	< 1
Formaldehid	Izolacija, pokućstvo, tekstil	0,06–1,3 mg m ⁻³	> 1
Radon i njegovi potomci	Građevni materijal, podzemna voda, zemljište	0,1–30 nCi m ⁻³	>> 1
Azbest	Toplinska izolacija	1 vlakno po cm ⁻³	1
CO ₂	Sagorijevanje, metabolizam stanara i životinja	5 400 mg m ⁻³	>> 1
Bakterije	Ljudi, domaće životinje, glodavci, insekti, biljke, gljivice, ovlaživači zraka	—	> 1
O ₃	Električno iskrenje ultraljubičasto svjetlo	40 μg m ⁻³ 400 μg m ⁻³	< 1 > 1

Vrijednosti u tablici su ilustrativne i ne predstavljaju srednje vrijednosti pri mjerenjima.

Moguće je učiniti matematičke modele kojima se opisuje kretanje vrijednosti koncentracije polutanta u zatvorenom prostoru. Ovakve jednažbe stanja moguće je postaviti bilo za pojedinačne polutante, bilo za njihovu smjesu (6).

Promjena ukupne količine polutanta u prostoriji (m_p) može se prikazati izrazom:

$$\frac{dm_p}{dt} = V \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

gdje je V volumen prostorije, C koncentracija polutanta u prostoriji i t vrijeme u kojem se ta promjena zbiva. Količina polutanta se može povećati bilo zbog prodora izvana, bilo zbog postojanja aktivnog izvora polutanta unutar prostorije. Izdašnost izvora označava se sa Q i ima dimenziju MT^{-1} . Doprinos izvana opisuje se preko vanjske koncentracije C_1 i protoka zraka kroz prostoriju F .

Do smanjenja količine polutanta dolazi uslijed postojanja »ponora« polutanata, tj. mjesta i načina njihove eliminacije odnosno rekombinacije. Djelovanje ponora se opisuje preko veličine D koja predstavlja mjeru gubitka polutanta i ima dimenziju T^{-1} .

Do smanjivanja dolazi također uslijed toga što u ravnotežnom stanju prostoriju mora napustiti jednaka količina zraka koja u nju i ulazi. Pri tom treba uzeti u obzir da se zrak pridošao izvana ne miješa potpuno sa zrakom unutar prostorije, što znači da će dio tog vanjskog zraka nepromijenjen i izaći. Miješanje se opisuje bezdimenzionalnim faktorom miješanja k . Za savršeno miješanje vrijednost k bi bila jednaka jedinici. U praksi se vrijednost k kreće između 0,1 i 0,4.

Sada je moguće opisati ukupnu promjenu količine polutanta u prostoriji izrazom:

$$\frac{dm_p}{dt} = V \frac{dC}{dt} = Q + FC_1 - DCV - (1 - k) FC_1 - kFC \quad (2)$$

Iz toga slijedi:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} + \frac{kF}{V} C_1 - DC - \frac{kF}{V} C \quad (3)$$

Faktor kF/V obilježava se sa S i nazivamo ga iznosom efektivne izmjene zraka u prostoriji. Jednažba (3) sada poprima oblik:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} + SC_1 - (D + S) C \quad (4)$$

Iz jednažbe (4) se vidi da je u ravnotežnom stanju iznos koncentracije C opisan izrazom:

$$C = (D + S)^{-1} \left(\frac{Q}{V} + SC_1 \right) \quad (5)$$

Pretpostavi li se da su veličine Q, D, S i C_1 konstantne što najčešće i odgovara prirodnim uvjetima za relativno duga razdoblja, tada rješenje jednadžbe (4) glasi:

$$C = C_0 e^{-(S+D)(t-t_0)} + \left(\frac{Q}{V} + SC_1 \right) (S + D)^{-1} (1 - e^{-(S+D)(t-t_0)}) \quad (6)$$

gdje je $C_0 = C(t_0)$ koncentracija polutanta u prostoriji u trenutku početka promjene t_0 .

Nakon dovoljno dugog vremena koncentracija se ustaljuje, pa eksponencijalni članovi trnu i iznos koncentracije teži ravnotežnoj koncentraciji opisanoj izrazom (5).

Preko općeg rješenja (6) moguće je opisati pojedine specifične slučajeve koji su od interesa u praksi.

Ako u prostoriji ne postoje izvori i ponori polutanta, tada će se njegova koncentracija mijenjati prema izrazu oblika:

$$C = C_0 e^{-S(t-t_0)} + C_1 (1 - e^{-S(t-t_0)}) \quad (7)$$

Ukoliko je vanjska koncentracija zanemarivo malena spram unutrašnje ili jednaka nuli, ovaj se izraz reducira na još jednostavniji oblik:

$$C = C_0 e^{-S(t-t_0)} \quad (8)$$

Teorijski dobivena rješenja ovog tipa uspoređivana su s eksperimentalno dobivenim rezultatima i pri tom su dala zadovoljavajuće rezultate za ponašanje koncentracija CO, CO₂, NO i NO₂ u zatvorenim prostorijama, dok je slaganje za O₃ bilo slabo (13).

Izdašnosti pojedinih izvora polutanata Q određuju se preciznim laboratorijskim analizama, no ponekad ih je moguće odrediti i iz mjerenja obavljenih na terenu.

Brzina prirodne izmjene zraka u prostorijama je također podatak od vitalnog značenja pri izučavanju onečišćenja unutrašnje atmosfere. Ona se kreće u granicama od 0,2 do 2 pa i više izmjena na sat. Određuje se uglavnom eksperimentalno. Jedna od metoda zasniva se na upotrebi plina za obilježavanje (tracer gas). U prostoriju se pušta 10 do 100 puta veća koncentracija plina za obilježavanje od one koju je moguće otkriti instrumentima kojima se koristimo. Pomoću jednadžbe (8) uz mjerenje koncentracija u različitim trenucima t i uz pretpostavku dobrog miješanja zraka u prostoriji dolazi se do iznosa brzine izmjene zraka. Kao plin za obilježavanje se najčešće upotrebljavaju N₂O, CO₂ i SF₆. Drugi je pristup da se u prostoriji održava stalna koncentracija plina za obilježavanje, a brzina izmjene zraka se računa preko vrijednosti izdašnosti izvo-

ra Q, potrebne za održavanje stalne koncentracije i jednadžbe (5) koja se u ovom slučaju uz $D, C_1 = 0$ reducira na oblik:

$$S = \frac{Q}{VC} \quad (9)$$

Druga metoda, koja se često primjenjuje u praksi, svodi se na mjerenje struje zraka koja izlazi iz prostorije pri održavanju konstantnog natp pritiska u njoj. Iako se pri korištenju ove metode dolazi do iznosa izmjene zraka posrednim putem, ona ima prednost pred prethodnom što je neosjetljiva na smjer i brzinu vjetra izvan zgrade.

GLAVNE VRSTE POLUTANATA UNUTRAŠNJE ATMOSFERE

Lebdeće čestice

Porijeklo lebdećih čestica u unutrašnjoj atmosferi raznoliko je kao i njihov sastav. Čestice nastaju sagorijevanjem, penetracijom izvana, bojenjem površina, piljenjem, brušenjem, bušenjem, trošenjem materijala, upotrebom izolacije, kretanjem stanara, pušenjem, čišćenjem stana, kemijskim reakcijama iz plinova itd. Prisutne su uvijek u većem ili manjem broju, a njihov sastav i raspodjela po veličini ovise o porijeklu. Štetno djelovanje čestica, koje nisu toksične ili potencijalno kancerogene, očituje se u mehaničkim podražajima respiratornog trakta, otapanjem topljivih čestica na sluznici respiratornog trakta, alergijskim reakcijama na čestice organskog sastava itd. Sastav čestica i njihova raspodjela po veličini razlikuju se od slučaja do slučaja i relativno su neovisni o sastavu i spektru čestica u vanjskoj atmosferi, osim pri visokim iznosima brzine izmjena zraka kao što je slučaj kod prisilne ventilacije, odnosno provjetravanja.

Interpretacija rezultata mjerenja koncentracija čestica ovisi o njihovom sastavu i raspodjeli po veličini koji određuju stupanj štetnosti za ljudsko zdravlje (14, 15).

Dok se udio čestica biološkog porijekla u biti ne mijenja tokom godina, u novije vrijeme dolazi do sve većeg izražaja prisutnost anorganskih čestica (azbesta i mineralne vune) u unutrašnjoj atmosferi. Ovaj je problem izražen kako u novijim zgradama tako i u onim starijim u kojima je naknadno izvedena nova toplinska izolacija.

Ugljik-monoksid

Ugljik-monoksid predstavlja značajan problem onečišćenja unutrašnje atmosfere, naročito tokom zimskog perioda kao posljedica izgaranja velikih količina goriva, odnosno cijele godine u blizini prometnica s intenzivnim prometom.

Izvori ugljik-monoksida u unutrašnjoj atmosferi, koji najviše doprinose osobnoj izloženosti, svakako su plinski štednjaci, plinski bojleri i peći bez odvoda u dimnjak, te napose štetna navika pušenja.

Prisutnost ugljik-monoksida treba suzbijati prvenstveno provjerom načina izgaranja goriva u ložištima i plamenicima, upotrebom pravilno konstruiranih i održavanih dimnjaka kao i održavanjem dovoljne izmjene zraka u prostorijama.

Mjerenja osobne izloženosti ugljik-monoksidu provedena u Zagrebu tokom sezone 1980/81. (5) pokazuju ovisnost o načinu grijanja stambenog i poslovnog prostora u kojem su ispitanici boravili, kao i o načinu i trajanju prijevoza ispitanika. Na izloženost ugljik-monoksidu utječe također način i trajanje pripremanja obroka.

Poseban problem onečišćenja unutrašnje atmosfere ugljik-monoksidom jest pušenje, posebice u javnim i poslovnim zgradama i prostorijama. Dok za pušače koncentracija koju nalazimo u unutrašnjoj atmosferi predstavlja tek sitan doprinos njihovoj osobnoj izloženosti, za nepušače, tzv. pasivno pušenje, predstavlja značajan dio njihove osobne izloženosti.

Za ugljik-monoksid možemo reći da predstavlja izrazit problem onečišćenja unutrašnje atmosfere, dok je doprinos onečišćenja vanjske atmosfere relativno malen osim u blizini prometnica i dimnjaka (16).

Izrazit afinitet hemoglobina spram ugljik-monoksida dovodi do formiranja karboksihemoglobina u krvi i posredno do slabijeg vezanja kisika. Slabija opskrba kisikom ima za posljedicu mnoge fiziološke poteškoće i smetnje, a u krajnjem slučaju može dovesti i do smrti. Posebni problem pri trovanju ugljik-monoksidom je u tome što se radi o plinu bez boje i mirisa koji je nemoguće otkriti njuhom, što onemogućava pravodobno poduzimanje mjera za suzbijanje otrovanja.

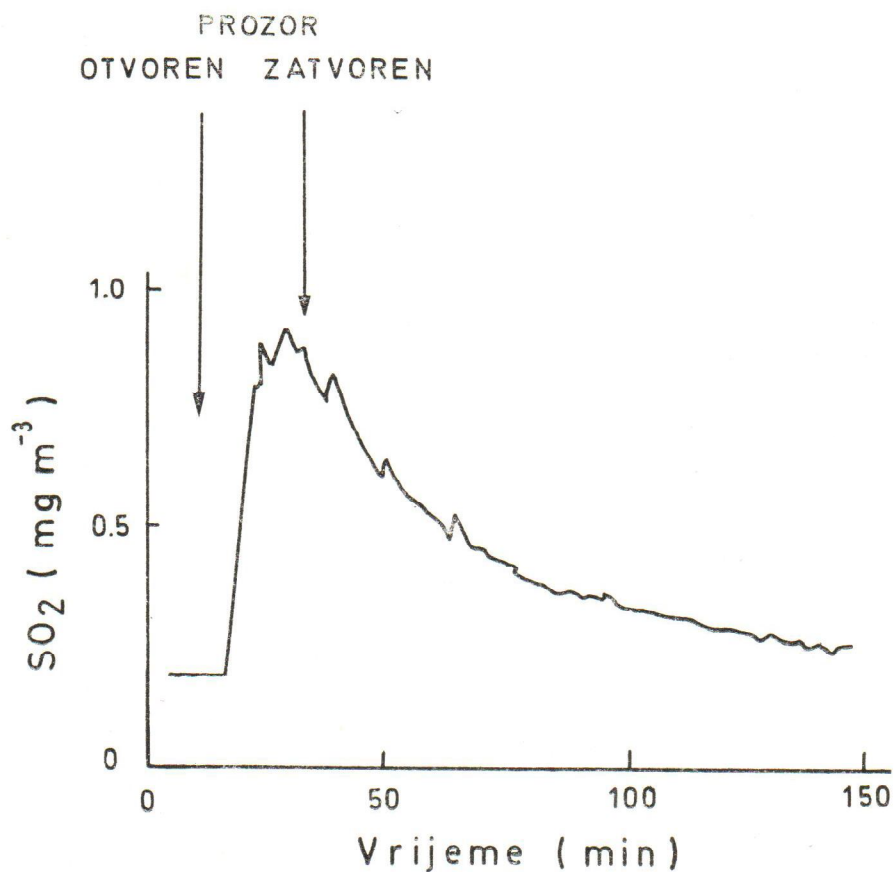
S obzirom na štetnost za zdravlje, pa čak iznimno i opasnost za život, problem ugljik-monoksida u unutrašnjoj atmosferi se intenzivno proučava (17, 18).

Gomilanje ugljik-monoksida u zatvorenom prostoru, u prisutnosti aktivnog izvora prikazano je sljedećim primjerom. Promatrane su koncentracije CO u dvije identične prostorije, volumena 85m³ u kojima boravi 25 ljudi. U jednoj od njih se popuši 100 cigareta na sat, dok se u drugoj ne puši. Faktor miješanja u obje prostorije iznosi 1/3. Kao varijabla je uzeta veličina izmjene zraka u prostoriji, te je računata koncentracija za različita vremena. Rezultati su prikazani na slici 1. Pokazuje se izrazita ovisnost koncentracije o veličini izmjene zraka u prostoriji i vidljivo je da pri malom broju izmjena dolazi do značajnog gomilanja CO u prostoriji gdje se puši. Svakako treba naglasiti da ove vrijednosti prikazuju prosječnu ekspoziciju nepušača u takvoj prostoriji, a ne pušača koji direktno inhaliraju dim cigarete.

Sumpor-dioksid

Sumpor-dioksid je onečišćenje unutrašnje atmosfere koje najčešće penetrira izvana. Nastaje izgaranjem goriva koje sadrži sumpor poput ugljena i tekućih goriva. Osim penetracije izvana može nastati kao posljedica neispravnih kućnih ložišta i neadekvatnih dimnjaka. Njegova se koncentracija u zatvorenom prostoru relativno brzo snižava reakcijom s materijalima u kućanstvu (sl. 4), te na taj način dovodi i do materijalnih šteta nagrivanjem i oštećivanjem površina i ubrzavanjem procesa korozije.

Po djelovanju na zdravlje ljudi sumpor-dioksid spada u nadražljivce gornjih dišnih putova. Postoje indicije da pri duljem djelovanju prosje-



Sl. 4. Porast i pad koncentracije sumpor-dioksida u prostoriji pri otvaranju i zatvaranju prozora (6)

čnih koncentracija već od 70 do 80 $\mu\text{g m}^{-3}$ može doći do opstrukcije dišnih putova i konačno do kroničnog bronhitisa (19). Izloženost je izračunata na temelju podataka da ispitanici borave oko 30% vremena vani pri srednjoj godišnjoj koncentraciji od 150 do 170 μgm^{-3} i 70% vremena u prostorijama sa četiri puta nižom koncentracijom.

Omjer prosječne koncentracije sumpor-dioksida u unutrašnjoj atmosferi u odnosu na vanjsku, opada s povišenjem koncentracije. Dok se sumpor-dioksid u vanjskoj atmosferi mjeri i izučava kao jedan od osnovnih polutanata, u unutrašnjoj mu se atmosferi ne pridaje veće značenje.

Dušikovi oksidi

Dušikovi oksidi (pretežno NO i NO₂) nastaju sintezom dušika i kisika iz zraka kao posljedica procesa izgaranja pri visokim temperaturama (20, 21). To se događa najčešće pri upotrebi plinskih peći i štednjaka, te benzinskih i diesel-motora. Pušenje je također jedan od uzroka njihove prisutnosti u zatvorenom prostoru, no u usporedbi s količinama NO koje nastaju gorenjem plinskih plamenika, doprinos pušenja je gotovo zanemariv. Pri samom procesu formiranja dušikovih oksida stvara se relativno više NO, no on se postepeno oksidira u NO₂.

Po djelovanju na zdravlje ljudi NO je vrlo inertan, dok je NO₂ koji je slabije topiv od SO₂, nadražljivac donjih dišnih putova. Postoje indicije da djeca koja žive u kućama s plinskim štednjakom češće boluju od bolesti dišnih organa (22), što upućuje na moguće kronično djelovanje pri dugotrajnoj izloženosti NO₂.

Koncentracije u zatvorenom prostoru bez unutrašnjih izvora su niže od onih u vanjskoj atmosferi što je posljedica reakcija dušikovih oksida s materijalima u domaćinstvu.

Formaldehid

Formaldehid je tipičan polutant unutrašnje atmosfere. Javlja se kao posljedica upotrebe suvremenih materijala u stambenoj industriji i industriji pokućstva. Materijali koji ga najčešće otpuštaju jesu šper-ploče, iverice, mediapan-ploče, tekstil, zavjese i sagovi. Nastaje i pri izgaranju plina u plinskim pećima i štednjacima. Oslobađa se pri upotrebi raznih ljepila, osobnih dezodoransa, papirnatih proizvoda itd. (23). Pušenje je također jedan od uzroka njegove prisutnosti u zatvorenom prostoru.

Koncentracije formaldehida su redovito više u unutarnjoj negoli u vanjskoj atmosferi.

Formaldehid zauzima važno mjesto među polutantima atmosfere zbog široke primjene i izrazite štetnosti za zdravlje. Djeluje kao nadražljivac sluznica, a stupanj djelovanja ovisi o koncentraciji i o vremenu izloženosti. Kratkotrajna izloženost dovodi do nadražaja očiju, nosa i grla.

Učestala ili produžena izloženost dovodi, osim već do prije navedenih simptoma, do kašlja, povraćanja, glavobolja, slabosti, umora i nadražaja kože.

Sklonost formaldehida reakcijama s bjelančevinama govori o njegovoj mogućoj kancerogenosti.

Uzročna veza između koncentracije formaldehida u zatvorenom prostoru i navedenih zdravstvenih posljedica česta je tema ispitivanja u novije vrijeme (24, 25, 26, 27, 28, 29).

Azbest

Karakteristike kao što su trajnost, čvrstoća vlakana, izvrsna svojstva toplinske, električne, pa i zvučne izolacije dovele su do široke upotrebe azbesta, prvenstveno u građevinarstvu i industriji opremanja stanova i zgrada.

Trajnost vlakana azbesta ostaje sačuvana pri svim načinima upotrebe, a isto tako i unutar čovječjeg organizma.

Upotrebljava se za pokrivanje stropova, zidova i podova, pri izradi papira, tkanina, filtara, zaptivki, cementa, ploča, cijevi i izolacijskih materijala. Nanosi se također u obliku »spraya«.

Materijali koji sadrže azbest vrlo lako ga otpuštaju. Do toga dolazi najčešće pri oštećenju ili naprezanju, bilo mehaničkom, bilo termičkom.

Karakteristika azbesta je velik omjer dužine spram promjera vlakana. S obzirom na dimenzije vlakana vrijeme zadržavanja u mirnom zraku iznosi od nekoliko sati do nekoliko dana. Ovo se vrijeme može produžiti vanjskim uzrocima, turbulencijom, promjenama strujanja zraka itd.

Čestice azbesta ulaze u tijelo najčešće kroz respiratorni trakt, ali mogu ući i preko probavnog trakta. Dalje se distribuiraju tijelom limfnim, odnosno krvožilnim sistemom.

Iako ne postoji određena granica veličina, smatra se da opasnost za zdravlje ljudi predstavljaju vlakna kraća od $5 \mu\text{m}$ i promjera manjeg od $2,5 \mu\text{m}$, koja zbog svojih malenih dimenzija relativno lako prodiru u respiratorni trakt.

Djelovanje na zdravlje može biti višestruko. Najčešće je kronično i česta su duga latentna razdoblja.

Od posljedica benignog djelovanja treba spomenuti promjene na koži, dok se maligno manifestira u obliku raka pluća, mezotelioma, raka organa probavnog trakta itd. Pušenje povećava rizik pojave raka pluća (30.)

Radon i potomci

Zadnjih se godina intenzivno izučavaju razine koncentracija radona u unutrašnjoj atmosferi. Porast koncentracije je izravna posljedica smanjenja brzine izmjena zraka u toplinski izoliranim zgradama i prostorijama. Radon i njegovi potomci pokazuju tipičan primjer kumuliranja polutanata u zatvorenom prostoru.

Smatra se da su glavni izvor radona građevni materijali kao i zemljište na kojem je zgrada izgrađena. Beton je u usporedbi s tлом relativno slab izvor, no i to ovisi o vrsti upotrijebljenog cementa, šljunka i pijeska. Red veličine omjera doprinosa koncentraciji radona u zraku između betona i tla je 1:10 (4).

Ispitivanja su pokazala da postoje velike varijacije u razinama koncentracija od zgrade do zgrade. Varijabilnost ovisi o vrsti izvora. Za podzemnu vodu se kreće od 1:1 000, za tlo 1:20, utjecaj meteoroloških faktora dovodi do varijabilnosti od 1:10, razlike u načinu projektiranja zgrada od 1:3 itd.

Pri traženju mogućeg izvora treba uvijek krenuti od onog za koji postoji najveća utvrđena varijabilnost. Naime, postoji najveća vjerojatnost da će njegov doprinos ukupnoj koncentraciji prevladati.

Imisija radona u unutrašnju atmosferu može se smanjiti izborom građevnog materijala, izborom zemljišta, upotrebom difuzijskih barijera, te zatvaranjem pora na površinama zidova, podova i stropova. No, navedene metode su nespretne i skupe, osobito u starijim zgradama. Jeftinije i lakše je ukloniti već postojeći radon iz zraka.

Najjednostavnija i vrlo djelotvorna metoda za uklanjanje radona je obična ventilacija prostorija, tj. izmjena već postojećeg zraka sa zrakom niske ili nulte koncentracije radona. Uz samo jednu izmjenu na sat koncentracija pada na manje od 10% vršne koncentracije u neventiliranoj prostoriji. Očit manjak ove metode uklanjanja radona iz unutrašnje atmosfere je povećanje utroška energije potrebne za grijanje prostorije.

Druga vrlo djelotvorna metoda je filtracija zraka u prostorijama. Pri tom postupku se ne eliminira radon, već njegovi potomci koji postoje u obliku slobodnih iona i pokazuju izrazitu tendenciju adsorpcije na postojeće aerosole, odnosno na zidove i ostale materijale u prostoriji. Djelotvornost adsorpcije ovisi o koncentraciji aerosola i njihovoj raspodjeli po veličini. Filtracijom se odstranjuju aerosoli s već nakupljenim potomcima radona. Smanjenje koncentracije aerosola filtriranjem ima za negativnu posljedicu opadanje brzine izdvajanja potomaka radona iz zraka. Da bi se uklonio ovaj problem, koncentracija aerosola se može održavati konstantnom umjetnim putem.

Smatra se da radon i njegovi potomci izazivaju rak pluća u ljudi koji su izloženi 2—3 puta većim dozama od onih kojima su ljudi izloženi u normalnoj životnoj okolini. Pri tome radon igra manju ulogu od svojih potomaka (4). Rizik pojave karcinoma pluća povećava se ako je izloženost radonu kombinirana s pušenjem (30).

Mirisi

Mnoštvo organskih i anorganskih spojeva, odnosno njihovih mješavina izaziva nadražaj osjetila mirisa, te na taj način čovjek postaje svjestan prisutnosti tih tvari u zraku. Pragovi osjeta mirisa su najčešće vrlo niski, što znači da čovjek može biti vrlo osjetljiv »detektor« stranih tvari u

zraku. Smatra se da je zrak koji ne podražuje osjetilo mirisa relativno »zdrav« i bezopasan, osim ako su prisutne štetne tvari koje se ne mogu otkriti olfaktorno poput CO ili para Hg.

Rijetko se može naići na okolinu u kojoj se baš ništa ne osjeća, no niske koncentracije najčešće ne iritiraju ili se na njih može relativno brzo adaptirati (4).

Intenzivni mirisi uzrokuju najčešće osjećaj neugode, teško je govoriti o pravoj šteti za zdravlje od mirisa kao takvog. Postoji ipak i veći broj otrovnih spojeva kojih miris može poslužiti kao upozorenje na prisutnost tih spojeva u zraku. Granice mirisa su redovito ispod granica toksičnosti, ali mogu biti vrlo blizu.

Prema izvoru mirisi se mogu podijeliti u velik broj skupina, ali u ovom kontekstu od interesa su mirisi koji se najčešće susreću u unutrašnjoj atmosferi.

Boravak ljudi u zatvorenom prostoru ima za posljedicu stvaranje mirisa od izlučevina kože, znoja, zadaha koji je posljedica pokvarenih zubi, digestivnih smetnji itd. Ni jedan od navedenih mirisa ne može se okvalificirati štetnim za zdravlje, no čest je osjećaj neugode, a u osjetljivih se osoba može javiti slabost, povraćanje i sl. Ove vrste mirisa mogu se ukloniti održavanjem osobne higijene i korištenjem velikih, dobro ventiliranih prostorija za sastanke velikog broja ljudi.

Dim cigareta sadrži oko 3 000 plinovitih sastojaka koji zajedno daju karakterističan miris. Općenito se smatra da miris koji nastaje kao posljedica pušenja predstavlja veći problem od drugih mirisa koje susrećemo u zatvorenom prostoru, kako zbog svoje agresivnosti tako i zbog učestale pojave. Zbog visokog sadržaja katrana u dimu cigareta, dim se nakuplja na površinama u prostoriji, npr. na pokućstvu, zavjesama, sagovima, odjeći stanara itd. Adsorbirane supstancije se polako tokom vremena desorbiraju i na taj se način stvaraju sekundarni izvori mirisa.

Prilikom pripremanja hrane također se proizvodi mnoštvo mirisa koje je usprkos njihovim međusobnim razlikama lako identificirati kao »mirise kuhinje«. Ima ih neugodnih, onih koji nas ostavljaju ravnodušnima, i ugodnih. Problem se najčešće javlja kada ovu skupinu mirisa osjetimo izvan kuhinje, npr. u dnevnoj ili spavaćoj sobi, jer ih tada gotovo redovno smatramo neugodnim i nepoželjnim. Moguće ih je u velikoj mjeri otkloniti upotrebom odsisnih kapa u kuhinjama. Kao i drugi mirisi i ovi se rado adsorbiraju na površinama u domaćinstvu, te na taj način stvaraju sekundarne izvore koji su aktivni još dugo vremena.

Mirisi koji se javljaju u kupaonicama i zahodima spadaju redovito u skupinu neugodnih mirisa. U tim je slučajevima potrebna dobra ventilacija što je u suprotnosti sa zahtjevima za štednjom energije. Recirkulacija zraka uglavnom ne dolazi u obzir zbog izrazito visokog sadržaja vlage.

Općenito se mirisi uklanjaju provjetravanjem, prisilnom ventilacijom i filtriranjem zraka (uglavnom mehanizmom adsorpcije na aktivni sadržaj filtra).

Ako nema mogućnosti da se mirisi uklone na navedene načine, tada treba pribjeći njihovom maskiranju raznim dezodoransima koji su stvarni jaki mirisi ugodna djelovanja. Dezodoransi su sastavni dio velikog broja proizvoda. Ugrađuju se čak i u materijale poput tekstila, ne bi li prikrili prisutnost formaldehida. Dezodoransi, koji su u biti isto polutanti, postali su sastavni dio unutrašnje atmosfere i već su se ljudi priklonili na njihovu prisutnost.

Ponekad loši mirisi prodiru izvana. To se događa u okolinama s visokim razinama onečišćenja zraka, uzrokovanim prisutnošću industrije, ili za vrijeme loših klimatskih ili mikroklimatskih uvjeta. U takvim slučajevima sistem za ventilaciju više odmaže no što pomaže.

Razvijene su i metode za mjerenje mirisa, no one su olfaktometrijske prema tome ipak više kvalitativne no kvantitativne naravi. Polazne točke tih metoda su definiranje intenziteta mirisa, karaktera mirisa, na temelju kojeg se klasificira, definiranje njegove prihvatljivosti ili neprihvatljivosti, te određivanje perioda trajanja mirisa.

SINDROM »NEZDRAVIH ZGRADA«

Tegobe povezane s boravkom u zatvorenom prostoru uočene su šezdesetih godina ovog stoljeća, da bi se učestalost nalaza radikalno povećala u zadnjih desetak godina. Ovaj nagli porast učestalosti pojave tog sindroma pokazuje ovisnost o porastu broja zatvorenih prostorija s prisilnom ventilacijom i klimatizacijom. Najčešće tegobe su:

- iritacija očiju, nosa i grla
- osjećaj suhoće sluznice
- svrbež
- psihički zamor
- glavobolje, kašalj, česte infekcije respiratornog trakta
- preosjetljivost, promuklost
- opća slabost, vrtoglavice.

S obzirom na to da se navedeni simptomi javljaju u svim populacijama, teško je odrediti da li su posljedica onečišćenja unutrašnje atmosfere, i ako jesu, uolikoj mjeri.

Ispitivanja izvršena u Danskoj (31) pokazuju da 15—30% pučanstva ima navedene tegobe bilo kod kuće, bilo na poslu. U Švedskoj (31) uočena je visoka učestalost sindroma (40%) u dječjim vrtićima, školama i sličnim ustanovama.

Zdravstvene teškoće stanovnika različitih zemalja su vrlo slične unatoč razlikama u vrstama gradnje i načinu stanovanja.

Zatvoreni se prostori mogu razlikovati prema trajanju sindroma koji se u njima pojavljuje.

Kategorija privremeno »nezdravih« zgrada odnosi se prvenstveno na nove zgrade ili novoobnovljene zgrade. Simptomi jenjavaju s vremenom

i najčešće nestaju nakon oko 6 mjeseci. Smatra se da je to posljedica isparavanja štetnih tvari iz svježih građevnih materijala upotrijebljenih pri gradnji.

U kategoriju permanentno »nezdravih« zgrada spadaju zgrade i prostorije u kojima se navedeni simptomi javljaju godinama i pokazuju se ponekad otporni na sve moguće mjere poduzete radi njihovog uklanjanja. Zajedničke karakteristike takvih zgrada su ove:

- gotovo uvijek imaju sistem za prisilnu ventilaciju koji posluhuje cijelu zgradu ili njezine veće cjeline. Zrak koji cirkulira tim sistemom samo se djelomično obnavlja zbog štednje energije. Ponekad se pokazuje da takve zgrade imaju nezgodno smješten ulaz zraka u sistem, u blizini stalno ili povremeno aktivnog izvora onečišćenja. Zbog znatnog udjela recirkuliranog zraka u sistemu vraćaju se u optjecaj već postojeći polutanti
- zgrade su najčešće lake konstrukcije
- podovi u prostorijama su najčešće pokriveni sagovima i tapisonima
- visina stropova u usporedbi sa starijim zgradama je manja što ima za posljedicu veći omjer površine prostorije spram njezina volumena
- prostorije su toplinski dobro izolirane, pa imaju slabu prirodnu izmjenu zraka
- vrlo često se prozori ne mogu otvarati.

Prvo, potrebno je provesti mjerenja mikroklimе u zgradama na koje se sumnja da su razlog opisanog sindroma kako bi se provjerilo da li temperatura, vlažnost i strujanje zraka unutar prostorije zadovoljavaju uvjete za udobno osjećanje ljudi, a zatim mjerenja drugih agensa na koje se sumnja da bi mogli biti uzročnici tegoba.

Pri ispitivanju sindroma »nezdravih« zgrada osim objektivnih uzroka zdravstvenih tegoba, ne smiju se zaobići subjektivni razlozi koji se javljaju u obliku odbojnog stava korisnika zgrade prema zgradi kao cjelini, opremi ugrađenoj u nju ili načinu ventilacije.

U Zagrebu je u zgradi nazvanoj »Zagrepčanka« provedeno ispitivanje stava prema klimatizaciji radnog prostora (3). Anketa, koja je pri tom provedena, pokazala je da se tegobe mogu javiti i kao posljedica odbojnog stava prema korištenju prisilne ventilacije i klimatizacije.

Anketa je pokazala:

- postoji razlika u stavu među spolovima; žene imaju negativniji stav od muškaraca
- pokazuje se ovisnost stava o dobi, no ta ovisnost nije statistički značajna
- negativan stav je češći u osoba s nižom ili srednjom stručnom spremom, negoli u onih s visokom
- stav prema klimatizaciji je povezan s općim stavom prema promjenama i novinama
- negativan stav pomalo jenjava s vremenom provedenim u zgradi

— stav ne ovisi o napučenosti prostorija, odnosno o broju osoba po jednom modulu, što ponovo govori u prilog subjektivnim, a ne objektivnim razlozima.

Potrebno je naglasiti da su usporedno s ispitivanjem stava izvršena mjerenja mikroklimе u zgradi. Rezultati mjerenja temperature, vlažnosti i strujanja zraka bili su unutar područja koje zadovoljava pojam »udobnosti« ljudi.

KAKO UTJECATI NA KVALITETU ZRAKA U PROSTORIJAMA?

Faktori gradnje

Već pri projektiranju i gradnji novih zgrada moguće je utjecati na buduću kvalitetu zraka u zgradi. Potrebno je zadovoljiti niz uvjeta za koje postoje kvantitativni ili samo kvalitativni pokazatelji o utjecaju na kvalitetu zraka.

Pri određivanju smještaja zgrade treba voditi računa o lokalnim strujanjima zraka, o namjeni prostora i o blizini eventualnog većeg izvora onečišćenja. Strujanje zraka oko zgrade ovisit će o geometriji okolnog terena, o smještaju i veličini susjednih zgrada, rasporedu okolne vegetacije, te o obliku i veličini zgrade koja se projektira.

Ispitivanja utjecaja brzine vjetra, kao i njegova smjera s obzirom na zgradu, pokazala su da se uz površinu zgrade stvaraju područja sniženog tlaka, što omogućava penetraciju plinova iz dimnjaka ili izvoda ventilacijskog sistema natrag u zgradu kroz mjesta koja dobro ne zaptivaju poput prozora, vrata, ulaza ventilacijskog sistema itd. Utjecaj brzine vjetra može se u većoj ili manjoj mjeri smanjiti ovisno o veličini i smještaju zgrade, postavljanjem zaštitnog zelenog pojasa. Dodatna će korist biti smanjenje buke koja prodire u kuću iz smjera gdje je postavljena vegetacija.

Potrebno je uzeti u obzir i namjenu zgrade, broj njezinih budućih korisnika, te vrijeme i način njezina korištenja. Gustoća naseljenosti je jedan od pokazatelja buduće kvalitete unutrašnje atmosfere, te ju je pri projektiranju nužno uzeti u obzir. Kod velike gustoće potrebno je u proračun onečišćenja zraka uzeti i produkte metabolizma ljudi kao što su CO₂, H₂O, razni vonjevi i slično.

Materijali i način njihove ugradnje utječu na više načina na kvalitetu zraka. Treba paziti na njihov izbor i kloniti se onih koji bi mogli otpuštati štetne tvari u zrak. U državi Massachusetts zabranjena je npr. upotreba urea—formaldehidnih pjena za izolaciju (31), a u Nizozemskoj je ograničena upotreba materijala koji otpuštaju formaldehid u toj mjeri da koncentracija u zraku prostorije premašuje 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ (32).

Provjetravanje zgrada i štednja energije

Pri projektiranju zgrade primjenjuju se odgovarajući standardi koji u stvari čine kompromis između zadovoljavanja zahtjeva za štednjom

energije potrebne za grijanje prostorija i iznosa izmjene zraka koji će osigurati potrebnu kvalitetu zraka u prostoriji.

Smatra se da donja granica iznosa izmjene zraka treba iznositi $0,5 \text{ h}^{-1}$ da ne bi došlo do gomilanja štetnih tvari u zraku iznad snošljivih koncentracija, kako bi se izbjegla pretjerana vlažnost, spriječio razvoj plijesni i ujedno utrošak energije sveo na zadovoljavajuću mjeru. U SR Njemačkoj ta vrijednost iznosi $0,8 \text{ h}^{-1}$. U Švedskoj se kao standard uzima 3 h^{-1} pri natpritisaku prostorije od 50 Pa za jednokatnice, odnosno 1 h^{-1} za trokatne zgrade (33).

Smatra se da je potrebno $0,35 \text{ L s}^{-1}$ svježeg zraka na 1 m^2 površine poda pri prosječnoj visini tavanice, odnosno da treba osigurati 4 L s^{-1} po osobi kako bi se koncentracija CO_2 održala na zadovoljavajućoj razini u stambenim prostorijama. Izvodi iz kuhinja i kupaonica trebali bi izbacivati zrak protokom od 10 L s^{-1} , a ukoliko kupaonice nemaju mogućnost provjetravanja, tada bi taj iznos trebalo povećati na 30 L s^{-1} .

Pokazalo se da smanjenje broja izmjena zraka za $0,1 \text{ h}^{-1}$ dovodi do smanjenja utroška energije od 1 000 do 2 000 kWh godišnje za grijanje prosječne obiteljske zgrade u klimi sjeverne Evrope (13).

ZAKLJUČCI

Dosadašnja su istraživanja pokazala da su ljudi često izloženi višim koncentracijama onečišćenja u zatvorenom negoli na otvorenom prostoru. Ako još uzmemo u obzir da čovjek u zatvorenom prostoru provede prosječno 80% vremena i da se u unutrašnjoj atmosferi javljaju i oni polutanti koje ne nalazimo na otvorenom prostoru, možemo slobodno zaključiti da izučavanju onečišćenja unutrašnje atmosfere treba dati primarno značenje pri ocjeni utjecaja onečišćenja zraka na zdravlje stanovnika.

Istraživanja onečišćenja unutrašnje atmosfere i modeliranje njegova nastajanja i nestajanja u ovisnosti o utjecajnim faktorima treba voditi donošenju normativa za izgradnju, opremu i provjetravanje zgrada, te preporuka, standarda, pa i zabrana za proizvodnju i prodaju materijala i uređaja namijenjenih za upotrebu u zatvorenom prostoru. Potrebno je odrediti koji su proizvodi i pod kojim uvjetima podobni za ugradnju u zgrade. Pri tom treba uzeti u obzir da li aktivnost izvora opada s vremenom ili ne, kolika je izdašnost izvora i u vezi s time koliki je potrebni broj izmjena zraka u prostoriji. Kao suprotan ograničavajući faktor treba uzeti štednju energije potrebne za grijanje prostorija.

Da bi se mogle poduzeti konkretne mjere za očuvanje kvalitete unutrašnje atmosfere, potrebno je učiniti ovo:

- definirati polutante važne za određenu zemlju ili regiju
- definirati različite tipove unutrašnjih atmosfera kako s obzirom na namjenu tako i s obzirom na način gradnje prostorija i upotrijebljene vrste materijala

- definirati prihvatljivi stupanj aeracije s obzirom na štednju energije za grijanje prostora
- izvršiti mjerenja koja bi dovela do direktnih pokazatelja o međusobnoj ovisnosti navedenih elemenata
- uskladiti zahtjeve očuvanja kvalitete unutrašnje atmosfere sa zahtjevima štednje energije i dati prijedlog optimalnog broja izmjena zraka, tipa izgradnje, kao i ograničenje upotrebe onih materijala koji pri danom stupnju aeracije predstavljaju izvore onečišćenja s visokom aktivnošću.

Jedan od važnih koraka pri očuvanju unutrašnje atmosfere bila bi standardizacija uređaja za grijanje i pripremu hrane kao i odsisnih sistema za te uređaje.

Pažnju treba posvetiti i ukusu, ponašanju i zahtjevima stanara, koji mogu izborom namještaja i ostale opreme za uređenje stambenog ili poslovnog prostora stvoriti probleme i u dobro projektiranim stanovima i uredima. Ovi problemi koji su najčešće posljedica neznanja mogu se riješiti odgojem i pravilnim informiranjem (obaveznim označavanjem sastava proizvoda, uputama o upotrebi rukovanju, upozoravanjem na moguće probleme preko sredstava javnog informiranja itd.).

Literatura

1. *Yocom, J. E.*: The indoor environment — A new frontier, TRC — The Research Corporation of New England, Weathersfield, Connecticut.
2. *Hollowell, C. D., Budnitz, R. J., Traynor, H. W.*: Combustion generated indoor air pollution, Proceedings of the 4th International Clean Air Congress, Tokyo 1977, Japanese Union of Air Pollution Prevention Associations (JUPPA), Tokyo 1977, str. 684—687.
3. *Sverko, B., Vukmirović, Ž.*: Ispitivanje stava prema klimatizaciji radnog prostora. Arh. hig. rada toksikol., 30 (1979) 323—332.
4. National Academy of Sciences, Indoor Pollutants, National Academy Press, Washington, USA 1981.
5. *Fugaš, M., Šega, K., Šišović, A.*: A Study of Personal Exposure to Airborne Respirable Particles and Carbon Monoxide. Environmental Monitoring and Assessment, 17 (1982) 157—170.
6. World Health Organization: Estimating Human Exposure to Air Pollutants, WHO Offset Publication No. 69, Geneva, Switzerland 1982.
7. *Fugaš, M.*: Assessment of Total Exposure to an Air Pollutant, Proceedings of the International Conference on Environmental Sensing and Assessment, 2, P III-II, Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., New York, USA 1976.
8. *Yocom, J. E., Clink, W. L., Cote, W. A.*: Indoor/Outdoor Air Quality Relationships. J. Air Pollut. Control Assoc., 21 (1971) 251—259.
9. *Benson, F. B., Henderson, J. J., Caldwell, D. E.*: Indoor/Outdoor Air Pollution Relationships, Vol. I-A, Literature Review, Publication No. AP-112, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 1972.
10. *Benson, F. B., Henderson, J. J., Caldwell, D. E.*: Indoor/Outdoor Air Pollution Relationships, Vol. II-A, Annotated Bibliography, Publication No. AP-112b, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 1972.

11. *Georgii, W.*: Investigation of the Air Exchange Between Rooms and the Air Outside. Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Series b, 5 (1954) 191—214.
12. *Yocom, J. E., Cote, W. A.*: Indoor/Outdoor Air Pollutant Relationships for Air-Conditioned Buildings, Ashrae, New York 1971. (preprint)
13. *Moschandreas, D. J., Stark, J. W. C.*: The Geomet Indoor/Outdoor Pollution Model, Rept. EF-628, Geomet Ing. Gaithersburg, USA 1977.
14. *Underhill, D. W., Esmen, N.*: Consistent Measurement of Indoor Airborne Particulates, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C2.
15. *Šega, K.*: Prilog ocjenjivanju opasnosti od areosola metodom kaskadne impakcije, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1981.
16. GEMS: Global Environmental Monitoring System, EFP 82.33 »Human Exposure to Carbon Monoxide and Suspended Particulate Matter in Zagreb, Yugoslavia«, World Health Organization, Geneva, 1982.
17. *Moschandreas, D.*: Spatial Variation of Carbon Monoxide and Oxides of Nitrogen Concentrations Inside Residence, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts 1981, Extended Summaries, C2.
18. *Girman, J. R., Apte, M. G., Traynor, G. W., Hollowell, C. D.*: Pollutant Emissions Rates from Indoor Combustion Appliances and Sidestream Cigarette Smoke, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C2.
19. *Sarić, M., Fugaš, M., Hrustić, O., Gentilizza, M.*: Effects of Urban Air Pollution on School-Age Children. Arch. Environ. Health, 36 (1981) 101—108.
20. *Lebret, E., Brunekreef, B., Biersteker, K.*: Indoor Nitrogen Dioxide Pollution in the Netherlands, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, A.
21. *Good, B. N., Vilcins, G., Harvey, W. R., Clabo, D. A. Jr. Lewis, A. L.*: Effect of Cigarette Smoking on Residential NO₂ Levels, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C2.
22. *Melia, R. J. W., Florey, C., Chinn, S.*: The Relationship Between Respiratory Illness in Primary Schoolchildren and the Use of Gas for Cooking: I-Results from a National Survey. Int. J. Epidemiol., 8 (1979) 333-338.
23. *Gupte, K. C., Ulmer, A. G., Preuss, P. W.*: Formaldehyde in Indoor Air International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C1.
24. *Godish, T.*: Survey of Indoor Formaldehyde Levels and Apparent Building-Related Illness in Conventional Housing in Delaware County, Indiana, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C1.
25. *Anderson, H. A., Hanrahan, L. P., Dally, K.*: Irritant Symptomatology: Clinical Observations and Formaldehyde Exposure Among Wisconsin Mobile Home Residents, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C1.
26. *Hanrahan, L. P., Anderson, H. A., Dally, K. A.*: A Multivariate Analysis of Health Effects in a Cohort of Mobile Home Residents Exposed to Formaldehyde, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C1.

27. Schanker, B. M., Weiss, S. T.: Health Effects of Indoor Formaldehyde Exposure, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, C1.
28. Hawthorne, A. R., Matthews, T. G.: An Inexpensive Passive Formaldehyde Monitor for Indoor Air Quality Measurements, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, B2.
29. Miksch, R. R., Geisling, K., Rappaport, S.: A New Passive Monitor for Determining Formaldehyde in Ambient Air, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts, 1981. Extended Summaries, B2.
30. Friberg, L., Nordberg, G.: Problems of Interactions in The Toxicity of Metals, Arh. hig. rada toksikol., 30 (1979) suppl. 103—112.
31. Dreher, T. J., Everett, J. J.: Legal Aspects of Indoor Air Pollution in Energy Efficient Residences, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts 1981. Extended Summaries, G.
32. Van der Kolk, J.: Indoor Air Pollution: Formaldehyde as an Example of the Approach in the Netherlands, International Symposium on Indoor Air Pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, Massachusetts 1981. Extended Summaries.
33. Indoor Air Pollutants Exposure and Health Effects Assesments, Internal report on a WHO Working Group, Nördlingen, 8—11 June 1982.

Summary

INDOOR AIR POLLUTION

The importance of indoor air pollution in evaluating personal exposure to air pollutants is pointed out and the most important indoor air pollutants and their sources are discussed. The time dependence of pollutant concentrations and their modelling are described. The »Sick building syndrome« and its sources are dealt with, so is the link between the quality of indoor atmosphere and the conservation of energy.

*Institute for Medical Research
and Occupational Health, Zagreb*

*Received for publication
February 17, 1983*